



کتابچه مقالات

۳۱ امین کنفرانس هسته ای ایران

» در این کتابچه، مقالات منتخب ارائه شده در ۳۱ امین کنفرانس ملی هسته ای ایران که از ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ در مشهد برگزار شد، خواهید یافت.
» امیدواریم آن را مفید و لذت بخش بیابید!

مقالات حوزه:

آشکارسازی و دزیمتری



پژوهشگاه علوم و فنون
هسته ای ایران

سازمان انرژی اتمی ایران

انجمن هسته ای ایران

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پژوهشگران گرامی، اساتید ارجمند و همکاران محترم،

مایه افتخار و مسرت بنده است که به عنوان رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران، خیرمقدم گرم و صمیمانه خود را تقدیم شما عزیزان می‌نمایم. در ادامه موفقیت چشمگیر دوره‌های پیشین این کنفرانس، امسال نیز شاهد گردهمایی استثنایی و پربار دانشجویان، پژوهشگران و اندیشمندان برجسته از دانشگاه‌های کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران و کارشناسان صنعت هستیم. کنفرانس امسال، با توجه به بازخوردهای ارزشمند دوره‌های قبل و نیازهای روز جامعه علمی و صنعتی، با رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر برگزار می‌شود. محورهای متنوع کنفرانس شامل تکنولوژی و ایمنی راکتورهای هسته‌ای، چرخه سوخت، مواد و پسماند هسته‌ای، غنی سازی و تولید ایزوتوپ پایدار، پرتوپزشکی و پزشکی هسته‌ای، کاربرد پرتوها در صنعت، کاربرد پرتوها در غذا، دامپروری و کشاورزی، شتابدهنده و دستگاه‌های مولد پرتو، آشکارسازی و دزیمتری، فیزیک و فناوری پلاسما و گداخت هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای، فناوری کوانتومی، مطالعات راهبردی و نرم می‌باشد. با افتخار اعلام می‌کنم که امسال بیش از ۳۷۰ مقاله کامل پذیرفته شده برای ارائه در این کنفرانس خواهیم داشت که از میان ۷۳ ارائه به صورت شفاهی و ۳۰ ارائه به صورت پوستر خواهند بود. همچنین با توجه به استقبال گسترده سال‌های گذشته، حدود ۳۰ نشست تخصصی و نیز نمایشگاه جانبی با رویکردی کاربردی‌تر و متنوع‌تر برگزار خواهند شد. پیش‌بینی می‌شود با احتساب فعالیت‌های جانبی، در حدود ۱۰۰۰ پژوهشگر در این رویداد علمی-فرهنگی در شهر مقدس مشهد حضور یابند. یکی از اهداف اصلی کنفرانس امسال، ایجاد پل ارتباطی مؤثرتر میان دانشگاه و صنعت است. ما معتقدیم دستاوردهای علمی زمانی ارزشمندتر خواهند بود که در مسیر حل مسائل واقعی جامعه و صنعت به کار گرفته شوند. از این رو، بخش ویژه‌ای به ارائه فرصت‌های همکاری میان پژوهشگران و صنایع اختصاص یافته است. در پایان، برای تمامی شرکت‌کنندگان، تجربه‌ای سرشار از دستاوردهای علمی، آموزنده و تحول‌آفرین را آرزومندم و امیدوارم این کنفرانس بتواند در ایجاد مسیری هموارتر برای گسترش کاربردهای یافته‌های علمی در صنعت و زندگی روزمره فراهم سازد.

با احترام،

دکتر جواد کریمی ثابت

رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران



برگزار کنندگان:



انجمن هسته‌ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



پرو، شگاه علوم و فنون هسته‌ای



حمایت کنندگان:



Sharif University
of Technology

دانشگاه صنعتی شریف



Amirkabir University
of Technology

دانشگاه صنعتی امیرکبیر



Shahid Beheshti
University

دانشگاه شهید بهشتی



FERDOWSI UNIVERSITY
OF MASHHAD

دانشگاه فردوسی مشهد



K. N. Toosi University
of Technology

دانشگاه خواجه نصیر
الدین طوسی



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی
اصفهان

دانشگاه تحصیلات تکمیلی
کرمان



Isfahan University

دانشگاه اصفهان



Shiraz University

دانشگاه شیراز



شرکت مصباح انرژی
(سهامی خاص)

شرکت مصباح انرژی



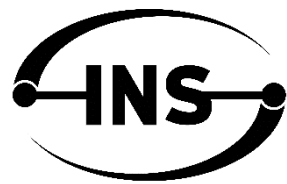
شرکت مادر تخصصی تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای ایران
Iran Atomic Energy Production and Development Co.

تولید مواد اولیه و سوخت
هسته‌ای ایران



Energy Industry
Development Engineering Co.

شرکت مهندسی و توسعه
صنایع انرژی نوین



مرکز ملی نظام کیفیت و استاندارد اتمی ایران

شرکت فناوری‌های
پیشرفته ایران

مرکز ملی نظام کیفیت و
استانداردسازی اتمی ایران



مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای
کشور



Radiation Application
Development Co.

شرکت توسعه کاربرد پرتوها

فهرست مقالات

طراحی و پیاده سازی تحلیلگر ارتفاع پالس مبتنی بر تراشه FPGA با بهینه سازی فیلترهای حذف نویز (کد مقاله : ۱۰۱۷) ۹۰

تشخیص اشیا در محموله های باری با استفاده از پردازش تصاویر اشعه ایکس (کد مقاله : ۱۰۸۲) ۱۶

تعیین تجربی ضرایب GEB برای آشکارساز BGO (۳×۳×۵) در بازه انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰۰۰ keV (کد مقاله : ۱۰۸۳) ۲۴

ارزیابی دزیمتری قرص های TLD کلسیم فسفات تولیدی به روش های تف جوشی SPS و PLS (کد مقاله : ۱۰۹۵) ۳۲

بررسی میزان دز دریافتی ارگان های حساس ناحیه توراکس در تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری با استفاده از کد مونت کارلوی GEANT4 (کد مقاله : ۱۰۹۹) ۴۰

ساخت ذرات $Zn_3(PO_4)_2:La$ و مطالعه خصوصیات دزیمتری ترمولومینسانس آن در پرتودهی گاما (کد مقاله : ۱۱۱۳) ۴۸

بررسی امکان اندازه گیری ذرات کیهانی با استفاده از آشکارسازهای میکروناوری به روش شبیه سازی مونت کارلو (کد مقاله : ۱۱۲۵) ۵۵

بررسی پارامترهای اصلی آشکارساز عبوری برای استفاده در طیف سنج زمان پرواز آلفا (کد مقاله : ۱۱۲۷) ۶۳

ساخت نانودزیمتر $LaF_3:Cu$ و بررسی پارامترهای سیتیک ترمولومینسانس آن به روشهای دمای توقف و برزش منحنی درخشش (کد مقاله : ۱۱۲۹) ۷۳

بهبود شناسایی رادیوایزوتوپ با تحلیل طیف بتا (کد مقاله : ۱۱۳۶) ۸۱

ساخت، ساختارشناسی و مطالعه خواص نوری باریوم فلوراید (کد مقاله : ۱۱۳۷) ۸۸

بررسی خصوصیات فوتولومینسانس و ترمولومینسانس LiB_3O_5 (کد مقاله : ۱۱۳۸) ۹۴

طراحی و ایجاد بانک داده از داده های خام آشکارسازهای قطعه بندی شده پادنوترینو برای استفاده در الگوریتم های یادگیری عمیق به منظور طبقه بندی رویدادها (کد مقاله : ۱۱۸۰) ۱۰۰

رشد تک بلورهای $CsI(Tl)$ و $CsI(Tl, Eu)$ و بررسی اثر یوروپیوم به عنوان آلاینده مضاعف (کد مقاله : ۱۱۸۲) ۱۰۷

ارزیابی پرتوگیری شغلی پرتوکاران ایران: یک تحلیل دزیمتری گذشته نگر پنج ساله (کد مقاله : ۱۱۸۳) ۱۱۴

طراحی بررسی میزان دز ناشی از چشمه گاما زای سزیم-۱۳۷ در فاصله های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری در هنگام وقوع سیل (کد مقاله : ۱۱۹۳) ۱۲۱

بررسی تجربی ترانزیستورهای BJT و خازن های الکتrolیتی و پلی استر به عنوان دزیمتر با استفاده از پرتوهای الکترون (کد مقاله : ۱۲۰۹) ۱۲۹

بررسی پاسخ فیلم دزیمتر های پلیمری ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوها با استفاده از نشانگر بروموکرسل گرین (کد مقاله : ۱۲۱۲) ۱۴۳



- تحلیل و بررسی عملکرد حفاظتی لنزهای عینک در برابر پرتوهای یونیزه‌کننده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (کد مقاله : ۱۴۹)..... (۱۲۱۷)
- توسعه یک پایگاه داده طیف های گاما نمونه های محیطی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو گیت (کد مقاله : ۱۲۲۳). ۱۶۱
- بررسی خواص فوتولومینسانس دزیمتری نیتريد کربن بور (کد مقاله : ۱۲۳۵)..... ۱۶۸
- مقایسه فیلترهای ترکیبی در سیستم تصویربرداری دهان و دندان جهت بهینه سازی طیف اشعه ایکس، یک مطالعه شبیه سازی شده (کد مقاله : ۱۲۵۵)..... ۱۷۵
- طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آشکارساز گازی به کمک پرینتر سه بعدی (کد مقاله : ۱۲۶۳)..... ۱۸۲
- مدل سازی فرآیند ساخت چشمه استاندارد کبالت-۶۰ با استفاده از روش الکترونشانی مبتنی بر آند مارپیچی در حضور میدان مغناطیسی خارجی (کد مقاله : ۱۲۶۹)..... ۱۸۹
- تهیه و تعیین خصوصیات ساختاری و فیزیکی نانوذرات اکسید ساماریم خالص و اکسید ساماریم گرافن‌دار جهت حفاظت در برابر تشعشع گاما: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌شده (کد مقاله : ۱۲۷۰)..... ۱۹۹
- بررسی تجربی و شبیه‌سازی شده ویژگی های ساختاری و حفاظت در برابر تشعشع گاما نانوذرات اکسید ساماریم خالص و اکسید ساماریم دوپ شده با ایتريم (کد مقاله : ۱۲۷۲)..... ۲۱۱
- تحلیل شدت فوتون‌های نوری در آشکارسازهای سوسوزن تحت تابش پرتوهای گاما: مطالعه‌ای مبتنی بر ابزار شبیه‌سازی GEANT4 (کد مقاله : ۱۲۷۳)..... ۲۲۰
- مقایسه پارامترهای فیزیکی دو آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) و ^{40}KBC در برابر تابش گامای چشمه های سزیم ۱۳۷ و کبالت ۶۰ (کد مقاله : ۱۲۷۴)..... ۲۲۸
- بررسی ذرات ثانویه تولید شده ناشی از برخورد ^4He , ^4He ($^4\text{He}^*\text{He}^4$) در مرکز MAGNEX با استفاده از فرایند اسپالیشن در ابزار $^4\text{Geant}$ (کد مقاله : ۱۲۷۸)..... ۲۳۵
- محاسبه پارامترهای تابع GEB به منظور شبیه سازی طیف ^{152}Eu در آشکارساز HPGe و ارزیابی طیف شبیه سازی شده (کد مقاله : ۱۳۰۰)..... ۲۴۴
- ارزیابی عملکرد حفاظتی میکروذرات و نانوذرات اکسید تنگستن برای اشعه ایکس تشخیصی به صورت تجربی و شبیه‌سازی با ابزار $^4\text{Geant}$ (کد مقاله : ۱۳۰۸)..... ۲۵۰
- روش اندازه گیری زمان مرده آشکارساز گایگر-مولر با استفاده از یک چشمه رادیواکتیو با نیمه عمر بالا (کد مقاله : ۱۳۰۹)..... ۲۵۷
- استفاده از روش افت هم دما در تعیین پارامترهای سینتیک دزیمتر ترمولومینسانس $^{100}\text{LiF:Mg;Ti(TLD)}$ تحت پرتودهی گاما در دز ۳ گری (کد مقاله : ۱۳۱۴)..... ۲۶۴
- یک مدل محاسباتی برای تعیین چگالی مواد در توموگرافی پراکندگی میون (کد مقاله : ۱۳۳۶)..... ۲۷۰



- ۲۷۹..... ساخت $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ به منظور دزیمتری ترمولومینسانس نوترون (کد مقاله : ۱۳۳۹).....
- ۲۸۹..... تاثیر افزودن ناخالصی ها بر ماده ترمولومینسانس $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ و بررسی خواص آن (کد مقاله : ۱۳۸۳).....
- ۲۹۶..... بررسی ترابرد حاملین بار در آشکارسازهای نیمه‌رسانای سیلیکونی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو (کد مقاله : ۱۳۸۵).....
- ۳۰۳..... مکان‌یابی چشمه با استفاده از تحلیل طیف انرژی در آشکارساز سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای (کد مقاله : ۱۳۹۳).....
- ۳۱۱..... مقایسه تجربی چهار نمونه پلی اتیلن بردار جهت استفاده در حفاظ سازی PGNA (کد مقاله : ۱۴۱۰).....
- مطالعه‌ی پارامترهای سینتیک دزیمتر تجاری $\text{LiF:Mg;Ti(TLD-100)}$ با پرتو دهی گاما با روش‌های مختلف (کد مقاله : ۱۴۱۶).....
- ۳۱۹..... ساخت و ارزیابی فیلم‌های نانوکامپوزیتی PVC تقویت شده با SnO_2 به منظور حفاظت از اشعه ایکس تشخیصی (کد مقاله : ۱۴۱۷).....
- ۳۲۶..... پتانسیل روغن خوراکی برای دزیمتری گذشته‌نگر در حوادث پرتوی (کد مقاله : ۱۴۱۹).....
- ۳۳۳..... به کارگیری قابلیت جدید $^{60}\text{MCNP}$ در تعریف تابش های زمینه در شبیه سازی مونت کارلوی طیف خروجی آشکارساز HPGe (کد مقاله : ۱۴۸۶).....
- ۳۳۸..... مدرج سازی مجازی سیستم شمارشگر تمام بدن با استفاده از کتابخانه‌ای از فانتوم‌های آماری (کد مقاله : ۱۴۸۹).....
- ۳۴۵.....



طراحی و پیاده سازی تحلیلگر ارتفاع پالس مبتنی بر تراشه FPGA با بهینه سازی فیلترهای حذف نویز (کد مقاله : ۱۰۱۷)

سادات شهابی، سیدمحسن^۱ - جعفری، حسین^{۲*}

۱. دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی، گروه مهندسی هسته ای

۲. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

در این پژوهش، اقدام به طراحی و ساخت نمونه‌ی اولیه‌ی یک تحلیلگر ارتفاع پالس مبتنی بر تراشه FPGA شده است. نمونه‌ی دیجیتال تحلیلگر ارتفاع پالس با استفاده از کد وریلاگ و در فرکانس کاری ۴۰ مگاهرتز طراحی شد. سیگنال خروجی آشکارساز به صورت تفاضلی به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۸ بیتی داده شده و خروجی آن به FPGA وارد می‌شود که نویزهای آن توسط یک فیلتر پایین گذر FIR تقلیل می‌یابد. در طراحی فیلتر از نرم افزار MATLAB توسط جعبه ابزار و از نوع باترورث استفاده شد. خروجی این جعبه ابزار نمودارهای اندازه، فاز و مکان هندسی صفرها و قطب به همراه ضرایب فیلتر می‌باشد. در ادامه، پس از اجرای الگوریتم قله‌یابی و دسته‌بندی، داده‌ها با استفاده از ارتباط سریال به کامپیوتر منتقل می‌شوند تا برای پردازش‌های بیشتر در اختیار کاربر قرار گیرد. برطبق نتایج، برد نهایی توانایی طیف سنجی چشمه‌ای با ۱۰۰۰۰ شمارش در ثانیه را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: تحلیلگر ارتفاع پالس، FPGA، FIR، مبدل آنالوگ به دیجیتال.

Design and implementation of FPGA chip-based pulse height analyzer with optimized noise reduction filters

Sadat Shahabi, Seyyed Mohsen^۱ - Jafari, Hossein^{۲*}

۱. Sharif University of Technology, Faculty of Energy, Department of Nuclear Engineering

۲. Amirkabir University of Technology, Faculty of Energy Engineering and Physics, Department of Nuclear Engineering

Abstract:

In this research, a prototype of a pulse height analyzer based on an FPGA chip was designed and built. The digital sample of the pulse height analyzer was designed using Verilog code in an operating frequency of 40 MHz. The detector output signal is differentially fed with an 8-bit analog-to-digital converter and its output is input to the FPGA, whose noise is reduced by an FIR low-pass filter. In the filter design, MATLAB software was used with the Butterworth toolbox. The output of this toolbox is the magnitude, phase, and geometric location diagrams of the zeros and poles along with the filter coefficients. Then, after executing the peak finding and classification algorithm, the data is transferred to the computer using serial communication to be made available to the user for further processing. According to the results, the final board has the ability to perform source spectroscopy with 10,000 counts per second.

Keywords: Pulse height analyzer, FPGA, FIR, analog-to-digital converter.



۱ - مقدمه:

سیگنال‌های خروجی آشکارسازهای هسته‌ای که در تصویربرداری‌های صنعتی و پزشکی استفاده می‌شوند، نیاز به پردازش سریع و مناسبی دارند تا بتوان از آنها به یک تصویر مناسب دست یافت. امروزه یکی از روش‌های بسیار متداول برای ارتقاء کیفیت سیستم‌های الکترونیکی، دیجیتالی کردن آنهاست. به این معنی که به جای استفاده از مدارات آنالوگ که شامل مقاومت، ترانزیستور و خازن‌ها می‌باشد، از مدارات منطقی دیجیتالی بهره می‌برند. این تغییر رویه مزیت‌هایی از قبیل افزایش قابلیت اطمینان، انعطاف پذیری بالاتر و نویز کمتر را دارا می‌باشد [۱، ۲].

در این پژوهش، تلاش می‌شود یک سیستم تحلیل ارتفاع پالس طراحی و ساخته شود. این سیستم باید با سرعت و دقت بالایی پالس‌های با ارتفاع تقریباً یکسان را در دسته‌های مجزایی قرار داده و طیف پرتوهای ورودی از آشکارساز را ترسیم نماید.

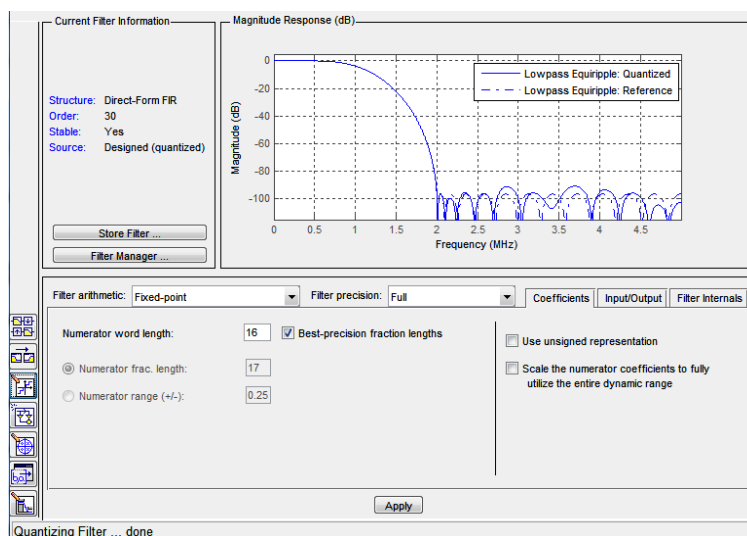
۲. روش تحقیق:

مراحل انجام پژوهش شامل تعیین مشخصات سیگنال ورودی، انتخاب مبدل آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری بالا، طراحی فیلتر دیجیتال مناسب، پیاده‌سازی فیلتر دیجیتال طراحی شده روی FPGA، اجرای الگوریتم قله یابی، شبیه‌سازی بخش پردازنده دیجیتال، شبیه‌سازی کل سیستم و اجرای بخش ارتباط سریال با کامپیوتر روی FPGA می‌باشد. سیگنال خروجی آشکارساز دارای دامنه حداکثر یک ولت و عرض پالس ۱۰ تا ۲۰ میکروثانیه است. در مورد کاربردهای تصویربرداری صنعتی، نرخ شمارش آشکارساز در حدود ۱۰۰۰۰ شمارش بر ثانیه خواهد بود [۲، ۳].

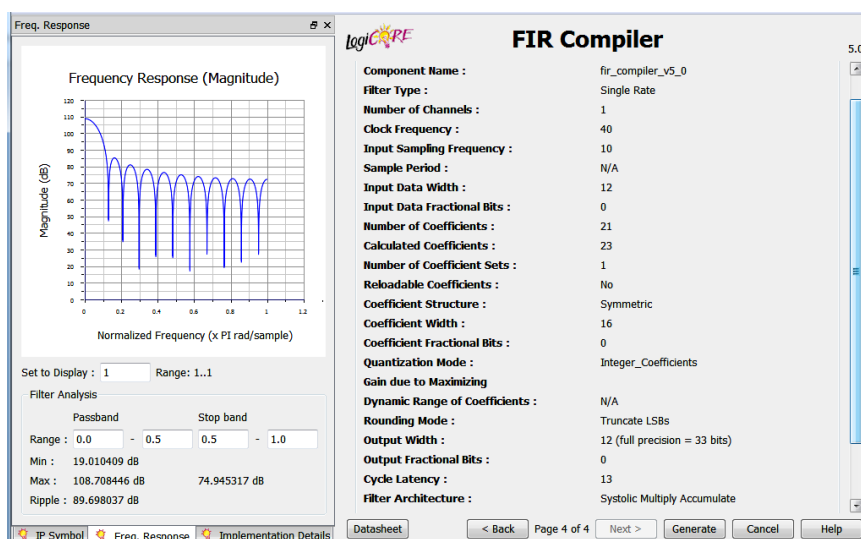
سیگنال ورودی دارای نویزهای متعددی است که روی عملکرد سیستم و نتیجه طیف نگاری تاثیر منفی می‌گذارند. برای حذف این نویزها از یک فیلتر پایین گذر دیجیتال استفاده شده است. این فیلتر از نوع FIR با فرکانس گذر ۵۰۰ KHz و فرکانس توقف ۲۰۰ KHz است. مرتبه فیلتر ۲۰ در نظر گرفته شده تا پیاده‌سازی آن روی FPGA فضای زیادی را اشغال ننماید. بهره باند گذر ۰ db و بهره باند توقف ۶۰ db- در نظر گرفته شده تا تضعیف قابل قبولی روی سیگنال‌های معادل نویز (فرکانس بالا) انجام شود (شکل ۱).

طراحی فیلتر در نرم افزار MATLAB توسط جعبه ابزار Fdatool برای طراحی یک فیلتر پایین گذر FIR از نوع باترورث استفاده شده است. خروجی این جعبه ابزار نمودارهای اندازه، فاز و مکان هندسی صفرها و قطب به همراه ضرایب فیلتر می‌باشد. با استفاده از ضرایب فیلتر می‌توان عملکرد فیلتر را توصیف نمود.

دو مورد از ویژگی‌های برجسته این جعبه ابزار که در این پژوهش نیز استفاده شده است، توانایی گسسته‌سازی ضرایب فیلتر برای استفاده در ابزارهای دیجیتال و سازگاری با ابزارهای طراحی فیلتر شرکت Xilinx می‌باشد. واضح است که ضرایب فیلتر طراحی شده اعداد اعشاری هستند اما در سیستم‌های دیجیتال تنها می‌توان از اعداد صحیح استفاده کرد. به همین دلیل Fdatool این قابلیت را ایجاد می‌کند که به جای ضرایب اعشاری از ضرایب صحیح استفاده شود و در عین حال فیلتر معادلی که با ضرایب صحیح ساخته شده، دقت خوبی نسبت به فیلتر اصلی داشته باشد. از طرف دیگر با توجه به قابلیت‌های سخت افزاری و نیاز موجود، لازم است اندازه و تعداد بیت‌های داده‌ها و دقت محاسبات را کنترل نمود که این امکان نیز در Fdatool ایجاد شده است. از طرف دیگر این جعبه ابزار این امکان را می‌دهد که ضرایب فیلتر طراحی شده، به صورت یک فایل با پسوند .coe ذخیره شوند. این فایل می‌تواند مستقیماً توسط هسته‌های آماده فیلتر FIR موسوم به IP Core مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: ابزار Fdatool برای طراحی فیلتر و گسسته‌سازی ضرایب آن.



شکل ۲: استفاده از IP Core برای طراحی فیلتر FIR.

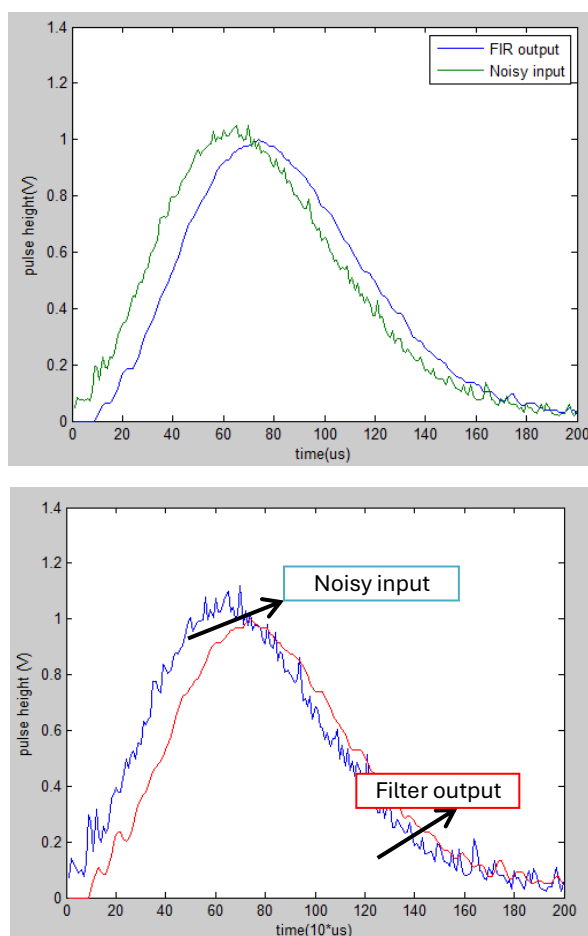
زمانیکه فیلتر مورد نظر در نرم افزار MATLAB طراحی شد و فایل .coe شامل ضرایب فیلتر تولید گردید، می‌توان آن را به ابزاری از نرم افزار ISE به نام FIR IP Core داد تا فیلتر مورد نظر ساخته شود. هسته فیلتر FIR این امکان را می‌دهد که انواع و اقسام پارامترهای فیلتر که در پیاده‌سازی سخت افزاری مورد نیاز هستند، به صورت گرافیکی مقداره‌ای شوند (شکل ۲). در این پژوهش از زبان سخت افزاری وریلاگ استفاده شده‌است.

در پژوهش حاضر فرکانس کار فیلتر ۴۰ MHz و فرکانس نمونه برداری از ورودی ۱۰ MHz در نظر گرفته شده‌است. ورودی و خروجی ۸ بیت هستند و فیلتر از مرتبه ۲۰ می‌باشد.



برای محاسبه قله سیگنال الگوریتم‌های مختلفی در مقالات پیشنهاد شده است که هر کدام متناسب با نیاز کاربر به سرعت یا دقت یا سخت افزار مورد استفاده بهینه شده اند. بهترین الگوریتم، الگوریتمی است که بتواند با بیشترین سرعت، پالس را دنبال و مقدار قله آن را محاسبه نماید. الگوریتم مورد استفاده در این بخش، الگوریتمی است که توسط والتین جردانف پیشنهاد شده است [4]. جردانف الگوریتمی بر اساس روش سطح پایین جداساز معرفی نمود که در آن، با در نظر گرفتن یک سطح آستانه برای نویز، مقدار ولتاژ قله پالس، محاسبه می‌گردد. سپس الگوریتمی جهت ردیابی افت و خیز پالس طراحی نمود. سپس با ترکیب این دو الگوریتم، روشی جهت محاسبه قله با ردیابی مقدار بیشینه و کمینه، با در نظر گرفتن سطح آستانه برای نویز طراحی نمود [۵].

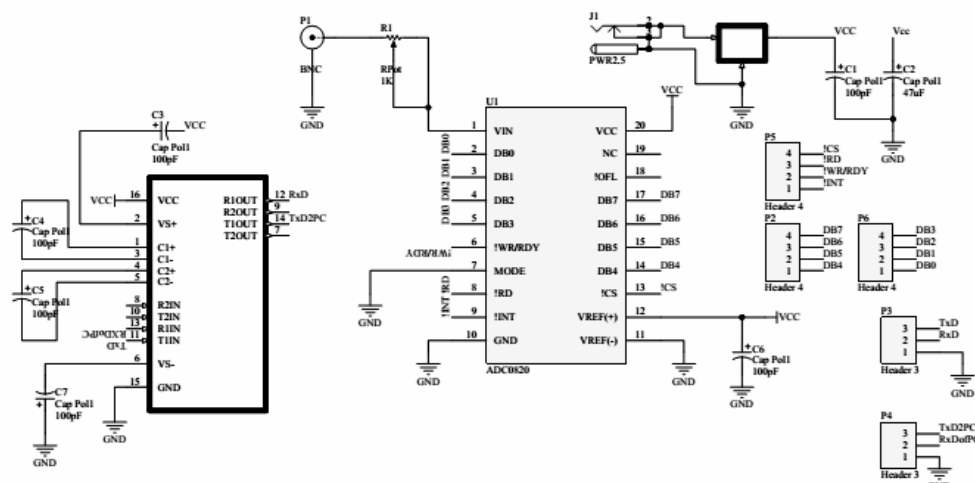
برای شبیه سازی بخش پردازش سیگنال که در قسمت‌های قبلی برخی از ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار گرفت، لازم است که یک خروجی نمونه از آشکارساز کریستال، توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به داده‌های ۸ بیتی تبدیل شود و به عنوان ورودی به ماژول پردازش سیگنال FPGA داده شود. خروجی سیستم نیز پس از پیدا شدن قله سیگنال نمایش داده می‌شود. در شکل شماره ۳ نویز گوسی یکبار با واریانس ۰.۰۵ و بار دیگر با واریانس ۰.۱ به سیگنال اصلی اضافه شد تا عملکرد فیلتر طراحی شده مشاهده شود.



شکل ۳: نتیجه شبیه‌سازی با استفاده از یک سیگنال با نویز گوسی کم (بالا) و زیاد (پایین).

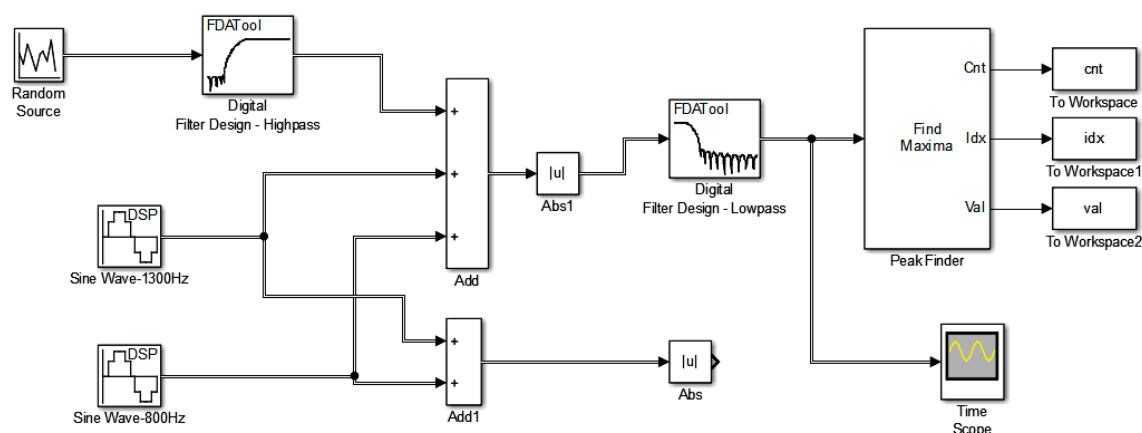


در این پروژه از یک برد آموزشی FPGA استفاده شده است که دارای ورودی و خروجی‌های موازی است. برای ارتباط با این برد به عنوان قلب پردازشی، یک برد جانبی طراحی و ساخته شد که روی آن یک مبدل ADC و لوازم جانبی آن، ابزارهای ارتباط سریال و منبع تغذیه این دو وجود دارد (شکل ۴). طراحی برد مذکور در نرم افزار Altium Designer انجام گرفته است.



شکل ۴: شماتیک مداری برد جانبی طراحی شده برای ارتباط FPGA با دنیای خارج.

برای شبیه سازی عملکرد کل سیستم و بررسی خروجی ناشی از ورودی های متنوع و سطح نویزهای متفاوت، یک شبیه سازی کامل در سیمولینک MATLAB انجام شد که در آن با استفاده از ضرایب فیلتر طراحی شده، بلوک های فیلتر Xilinx و مولدها و آشکارسازهای شبیه سازی شده می توان عملکرد سیستم طراحی شده را مشاهده نمود و طیف سیگنال های ورودی را رسم کرد. شکل ۵ نشان دهنده سیستم شبیه سازی شده در سیمولینک است و شکل ۶ نیز عملکرد آن را نشان می دهد.

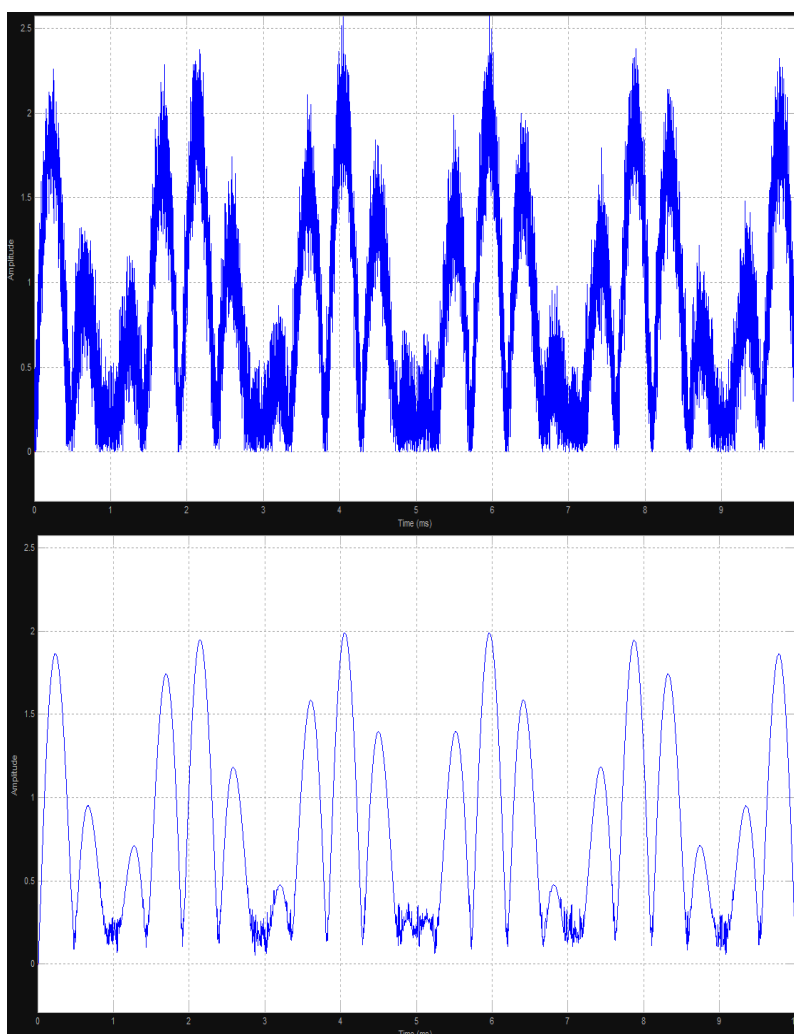


شکل ۵: شبیه سازی کل سیستم در سیمولینک MATLAB.



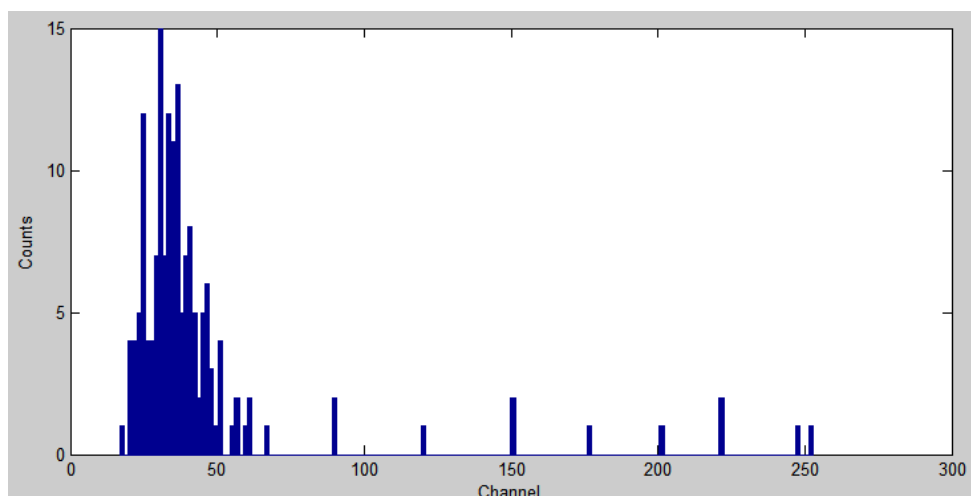
۲ - نتایج و بحث:

با استفاده از یک رشته پالس پشت سر هم که می‌تواند خروجی آشکارساز یا تولید شده توسط سیگنال ژنراتور باشد به عنوان ورودی برد، می‌توان نتایج را روی اسیلوسکوپ و کامپیوتر مشاهده نمود. در اینجا از رشته‌ای از پالس‌های سینوسی با دامنه‌های متفاوت و کمتر از یک استفاده شده‌است. برای تولید این سیگنال‌ها از جمع خروجی دو سیگنال ژنراتور استفاده شده است. دوسیگنال سینوسی با فرکانس‌های ۸۰۰ هرتز و ۱۳۰۰ هرتز هستند. نرخ قله‌های آشکار شده در حد ۱۰۰۰۰ قله بر ثانیه است.



شکل ۶: اثر اعمال فیلتر طراحی شده روی ورودی نویزی.

شکل ۷ طیف ثبت شده سیگنال ورودی را نشان می‌دهد. به خاطر نویزهای موجود در دامنه‌های پایین، تعداد قله‌ها در کانال‌های با شماره پایین بیشتر می‌باشد. کانال‌های بالاتر قله‌های اصلی را نشان می‌دهد. شکل طیف بدست آمده به صورت تابع پواسون می‌باشد که در واقع توزیع دامنه نویزهای وارد شده به سیگنال اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: طیف ثبت شده سیگنال ورودی.

۳ - نتیجه‌گیری:

در این پروژه یک تحلیلگر ارتفاع پالس مبتنی بر FPGA طراحی و ساخته شد که می‌تواند جایگزین نمونه‌های آنالوگ خود باشد. یکی از مشکلات مربوط به مدل آنالوگ تحلیلگر ارتفاع پالس انعطاف پذیر نبودن آن است. به این معنی که پس از ساخت نمی‌توان سیستم الکترونیکی را تغییر داد. ولی در سیستم دیجیتال ساخته شده می‌توان در هر زمان برد FGPA را از نو برنامه‌ریزی نمود و عملکرد سیستم را ارتقا بخشید. برای مثال به راحتی می‌توان فیلتر طراحی شده یا الگوریتم قله یابی را اصلاح و بهینه نمود.

۴ - مراجع:

- [۱] G. F. Knoll, "Radiation detection and measurement," John & Wiley Sons Inc, ۲۰۱۰.
- [۲] C. Imperiale and A. Imperiale, "On nuclear spectrometry pulses digital shaping and processing," *Measurement*, vol. ۳۰, pp. ۴۹-۷۳, ۲۰۰۱.
- [۳] ب. بقراتی, "طراحی و ساخت یک مدار پردازشگر سیگنال برای PET," دانشگاه صنعتی امیرکبیر, vol. پایان نامه دکترا, ۱۳۸۶.
- [۴] V. T. Jordanov, G. F. Knoll, A. C. Huber, and J. A. Pantazis, "Digital techniques for real-time pulse shaping in radiation measurements," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. ۳۵۳, pp. ۲۶۱-۲۶۴, ۱۹۹۴.
- [۵] V. T. Jordanov and G. F. Knoll, "Digital synthesis of pulse shapes in real time for high resolution radiation spectroscopy," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. ۳۴۵, pp. ۳۳۷-۳۴۵, ۱۹۹۴.



تشخیص اشیا در محموله‌های باری با استفاده از پردازش تصاویر اشعه ایکس (کد مقاله :

(۱۰۸۲

نیکخواه بهرامی، محمد^۱ - فلاحتی، میثم^۲ - عظیمی‌راد، روح‌الله^۳

۱. دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، گروه الکترونیک
۲. دانشگاه امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه فیزیک
۳. دانشگاه مالک‌اشتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه الکترونیک

چکیده:

روزانه تعداد قابل توجهی از محموله‌های باری از مرزها عبور می‌کنند که بررسی دقیق آن‌ها برای جلوگیری از قاچاق سوخت و ورود کالاهای غیرقانونی ضروری است. در این راستا، این پروژه باهدف توسعه سیستمی هوشمند برای شناسایی اشیا و نظارت بر محموله‌ها، فناوری پردازش تصویر را با الگوریتم‌های یادگیری عمیق ترکیب کرده است. هدف این سیستم، بهبود سرعت و دقت فرایندهای بازرسی در کنار مقابله مؤثر با مسائل امنیتی و قاچاق است. مدل YOLOv^۸ همراه با تصاویر اشعه ایکس دو انرژی کامیون‌های باری برای شناسایی بخش‌هایی مانند مخازن سوخت، موتورها، لاستیک‌های زاپاس و پیک‌های گازی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل پیشنهادی به میانگین دقت متوسط (mAP) ۰.۹۳۴ دست‌یافته که عملکرد برجسته‌ای در شناسایی اشیا با ابعاد و ویژگی‌های متنوع نشان می‌دهد. این مطالعه با ارائه یک رویکرد نوآورانه برای بازرسی‌های مرزی، پایه‌ای برای تحقیقات آینده فراهم می‌کند که امنیت مرزی را بهبود می‌بخشد و ورود کالاهای غیرقانونی را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: اشعه ایکس، امنیت مرزی، محموله، پردازش تصویر، تشخیص اشیا

Object Detection in Cargo Shipments Using X-ray Image Processing

Nikkhah Bahrami, Mohammad^{۱*}, Fallahati, Meysam^۲, Azimirad, Rouhollah^۳

۱. Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology.
۲. Department of Energy Engineering and Physics, Amir Kabir University of Technology.
۳. Department of Electrical and Computer Engineering, Malek-Ashtar University of Technology.

Abstract:

Every day, a considerable number of cargo shipments cross borders, making thorough screening essential for preventing fuel smuggling and the entrance of illegal commodities. To address this, the project intends to develop an intelligent system for object detection and cargo monitoring that combines image processing technology with deep learning algorithms. The goal is to improve the speed and accuracy of inspection processes while effectively tackling security issues and smuggling. The YOLOv^۸ model is used in conjunction with dual-energy X-ray scans of freight vehicles to detect parts such as gasoline tanks, motors, spare tires, and camping stoves. The proposed model had a mean average precision (mAP) of ۰.۹۳۴, suggesting outstanding detection performance for objects of diverse sizes and features. This study lays the groundwork for future research by proposing an innovative strategy to border inspections, which improves border security and reduces the entrance of illegal products.

Key words: X-ray, border security, cargo, image processing, object detection.



۱ - مقدمه:

افزایش تهدیدات امنیتی در بخش حمل‌ونقل، به‌ویژه در مرزها و گمرک‌ها، نیاز به ابزارهای پیشرفته برای شناسایی و بازرسی وسایل نقلیه و کالاهای بارگیری‌شده را بیشتر کرده است [۱]. به‌منظور حفظ امنیت در مرزها و مقابله با فعالیت‌های غیرقانونی، سیستم‌های بازرسی اشعه ایکس با استفاده از تابش الکترومغناطیسی پرنرژی، امکان بررسی غیرتهاجمی مواد و ساختارها را فراهم می‌سازد و به ابزاری ارزشمند در بخش‌های امنیتی و حمل‌ونقل تبدیل شده است [۲]. در روش‌های سنتی تحلیل تصاویر اشعه ایکس، نیروی انسانی مسئول بررسی و تصمیم‌گیری است با این وجود پیچیدگی ویژگی‌های تصاویر، مانند انسداد اشیاء و تنوع مقیاس آن‌ها، می‌تواند به خستگی و کاهش دقت در فرآیند تشخیص و تصمیم‌گیری بلادرنگ منجر شود [۱].

پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی و توسعه روش‌های پیشرفته در تشخیص و طبقه‌بندی، امکان افزایش دقت و کاهش زمان پردازش را فراهم کرده‌اند. یکی از کاربردهای مهم این فناوری، تشخیص خودکار موارد ممنوعه و مقابله با قاچاق، به‌ویژه قاچاق سوخت، از طریق تحلیل تصاویر اشعه ایکس است که به دلیل اهمیت بالای امنیتی و اجتماعی، نیازمند توجه ویژه است. با این حال، تصاویر حاصل از ماشین‌های سنگین به دلیل ابعاد بزرگ و جزئیات فراوان، چالش‌های قابل توجهی برای سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ایجاد می‌کنند. پردازش و تحلیل این تصاویر نیازمند روش‌های بهینه و توان پردازشی بالا است تا عملکرد سیستم در مواجهه با حجم زیاد اطلاعات تضمین شود [۳].

یکی از مطالعات برجسته در حوزه شناسایی اشیاء با استفاده از پردازش تصاویر اشعه ایکس، توسعه یک چارچوب برای بازرسی خودکار تصاویر محموله با اشعه ایکس است. پروژه‌ای با نام ^۱ACXIS (مقایسه خودکار تصاویر اشعه ایکس برای اسکن محموله) باهدف بهبود جریان کاری بازرسی از طریق خودکارسازی بخش‌هایی از فرایند تحلیل تصاویر اشعه ایکس انجام شد [۴]. این پروژه از تکنیک‌های پیشرفته الگوریتم‌های یادگیری عمیق، برای بهبود عملکرد وظایف شناسایی مانند تأیید کانتینرهای خالی و شناسایی تهدیدات خاص استفاده کرد [۵].

بیشتر پژوهش‌ها و منابع داده‌ای که در حوزه تشخیص اشیاء با استفاده از تصاویر اشعه ایکس انجام شده است، به شناسایی اقلام ممنوعه در چمدان‌های مسافران متمرکز بوده‌اند [۵]. همچنین از مدل‌ها و الگوریتم‌های متنوعی که غالباً بر پایه یادگیری نظارت شده و شبکه‌های عصبی پیچشی^۲ استفاده شده است [۶]. به‌عنوان مثال، اکی^۳ و همکاران از الگوریتم R-CNN سریع‌تر که به‌منظور بهبود سرعت و کارایی فرایند آموزش الگوریتم R-CNN توسعه یافته است، برای شناسایی و تشخیص اشیاء در یک پایگاه داده خصوصی به نام DBF استفاده کردند. این پایگاه داده شامل تصاویر کامل و قطعاتی از اشیاء خطرناک نظیر اسلحه و چاقو بوده و نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم مذکور در تحلیل تصاویر پیچیده است [۷]. سون هونگ

^۱ Automated Comparison of X-ray Images for Cargo Scanning

^۲ Convolutional Neural Network (CNN)

^۳ Akcay



چایی^۴ و همکاران شبکه MFA را برای شناسایی موارد ممنوعه در تصاویر اشعه ایکس و رفع چالش‌هایی مانند به هم ریختگی و تغییرات هندسی را پیشنهاد کرد. این شبکه علاوه بر مجموعه داده‌های SIXray در مجموعه داده مصنوعی ساخته شده با نام CargoX نشان داده و دقت آشکارسازها را بهبود داده است [۲].

پژوهش‌های گذشته، روش‌های تشخیص مبتنی بر اشعه ایکس برای شناسایی مواد خطرناک عمدتاً به یادگیری نظارت شده متکی بوده‌اند که نیازمند داده‌های برچسب‌گذاری شده فراوان هستند و تهیه آن‌ها هزینه‌بر و زمان‌بر است [۸]. در یک رویکرد جدید، جیاجی وو^۵ با ترکیب یادگیری خودنظارتی معماری‌های مبتنی بر ترانسفورمر^۶ و یادگیری متضاد را به عنوان راه‌حلی برای کاهش نیاز به برچسب‌گذاری داده‌ها پیشنهاد داده‌اند که بهبودهایی در دقت و کارایی در مجموعه داده‌های پیچیده مانند PIDray نشان داده‌اند [۹].

۲- روش کار:

برای آموزش مدل شناسایی اشیاء در تصاویر اشعه ایکس تریلی‌ها و اتوبوس‌ها، از معماری پیشرفته YOLOv^۸x استفاده شد که یکی از پیشرفته‌ترین نسخه‌های خانواده YOLO است که برای وظایف بینایی کامپیوتر از جمله تشخیص اشیاء، تقسیم‌بندی تصویر و ردیابی اشیاء طراحی شده است [۱۰]. این مدل با بهبود معماری، کاهش پیچیدگی محاسباتی و استفاده از بلوک‌های پیشرفته اشتراک جزئی در مراحل متقاطع^۷، قابلیت استخراج ویژگی‌های مهم را به صورت کارآمدتر دارد [۸]. این مدل به دلیل سرعت و دقت بالا در شناسایی اشیاء، یکی از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی عمیق در حوزه تشخیص اشیاء محسوب می‌شود. فرایند آموزش مدل شامل چندین مرحله مهم و دقیق بود که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود [۱۱].

۲-۱- منبع داده و پیش پردازش

در این پژوهش، ۵۵۷ تصویر از ماشین‌های سنگین، شامل تریلی‌ها و اتوبوس‌های عبوری از مرزها، توسط دستگاه‌های پیشرفته اشعه ایکس که به طور خاص برای بازرسی محموله‌ها طراحی شده‌اند، جمع‌آوری شده است. دستگاه‌های اشعه ایکس قادر به تولید تصاویری با وضوح بالا از محموله‌ها هستند که می‌توانند ساختار داخلی اجسام و اقلام موجود در داخل محموله‌ها را حتی در صورت وجود پوشش‌های پیچیده یا بسته‌بندی‌های متراکم، به دقت نمایان سازند [۶]. تصاویر به دست آمده از این دستگاه‌ها، اطلاعات مفیدی در خصوص محموله‌ها فراهم می‌آورد که برای شناسایی اشیاء غیرقانونی، تهدیدات امنیتی یا موارد ممنوعه بسیار حائز اهمیت است [۸].

شناسایی مؤثر اشیاء در تصاویر اشعه ایکس همچنین به روش‌های پیش پردازش قوی متکی است. ابتدا تصاویر برای شناسایی قابلیت مدل در شناسایی اشیاء با ابعاد مختلف با استفاده از ابزارهای حاشیه‌نویسی در چهار کلاس مخزن سوخت، موتور، لاستیک

^۴ Seung-Hoon Chae

^۵ Jiajie Wu

^۶ transformers

^۷ Cross Stage Partial v^۲



زاپاس، و پیک‌نیک برچسب‌گذاری شدند. به دلیل ابعاد بزرگ تصاویر برای ورودی مدل و مشکلات آموزش به وجود آمده برای شناسایی اشیاء کوچک، با حفظ برچسب‌های هر بخش آن‌ها به ۹ بخش تقسیم و به ابعاد ورودی مدل (۶۴۰×۶۴۰) تبدیل شدند. در مرحله بعد، تصاویر به حالت خاکستری تبدیل شدند تا حجم داده کاهش یابد، درحالی‌که اطلاعات مهم حفظ شوند. برای کاهش نویز، از الگوریتم حذف نویز موجود در کتابخانه OpenCV استفاده شد تا نویزهای ناخواسته حذف شوند و وضوح تصویر برای تشخیص بهتر مدل افزایش یابد.

برای افزایش تنوع داده‌ها و بهبود عملکرد مدل، از تکنیک‌های افزایش داده؛ مانند تغییر اندازه، چرخش، جابه‌جایی، تغییرات تصادفی و تصاویر بخش‌بندی نشده نیز برای افزایش داده‌ها در بخش آموزش مدل استفاده شد. این روش‌ها کمک کردند تا مدل در مواجهه با شرایط مختلف نوری، موقعیت‌های مکانی و مقیاس‌های متفاوت اشیاء، عملکرد بهتری داشته باشد. این تکنیک‌ها همچنین باعث بهبود تعمیم‌پذیری مدل و کاهش بیش‌برازش شدند [۸].

۲-۲- فرایند آموزش مدل

در طول فرایند آموزش، داده‌ها به دو مجموعه آموزشی و ارزیابی تقسیم شدند. ۸۵ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۱۵ درصد برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شدند. این تقسیم‌بندی امکان بررسی و مقایسه نتایج مدل در مراحل مختلف آموزش را فراهم کرد. در جدول (۱) برخی از فرآیندهایی که برای مدل تنظیم شده، بیان شده است. برای بهینه‌سازی فرایند آموزش، از الگوریتم نزول گرادیان تصادفی^۸ استفاده شد که نرخ یادگیری متغیر را در طول آموزش به کار می‌برد. همچنین کاهش وزن برای جلوگیری از بیش‌برازش اعمال شد.

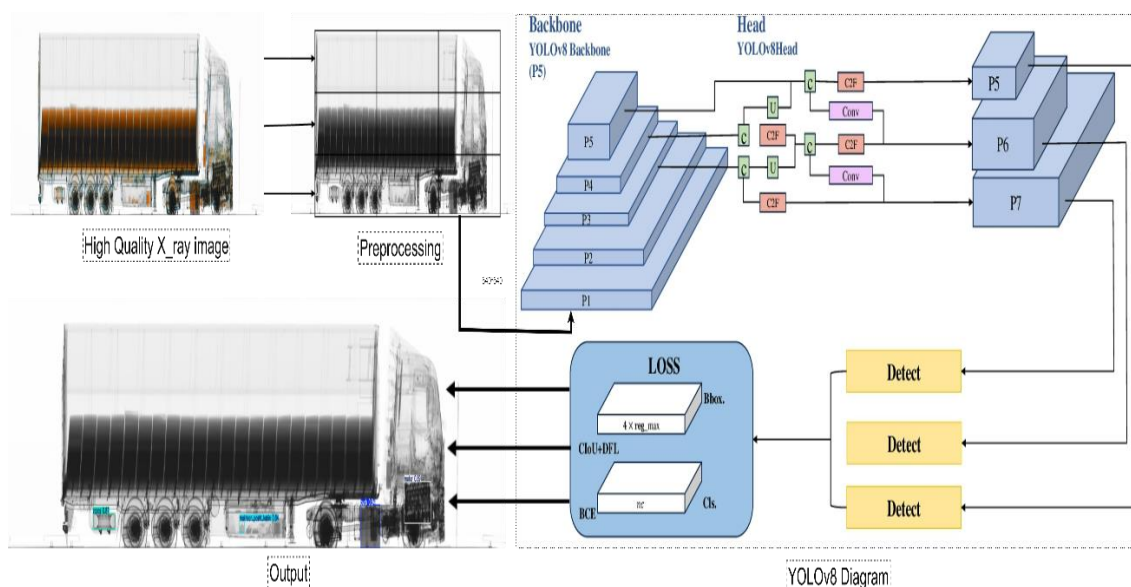
جدول ۱: فرآیندهای تنظیم شده مدل

مقدار	فرآیند
۷۰	تعداد تکرارها
۱۶	اندازه دسته
۰.۷	آستانه تشخیص درست
۰.۰۱	نرخ یادگیری
۰.۰۰۰۵	مقدار کاهش وزن

^۸ Stochastic Gradient Descent (SGD)



فرایند آموزش مدل با پردازنده گرافیکی قدرتمند گوگل کولب^۹ انجام شد که سرعت پردازش و کارایی را به طور قابل توجهی افزایش داد. در هر مرحله، مدل با استفاده از داده‌های ورودی و برجسب‌های مربوطه، وزن‌های خود را به روزرسانی کرد تا بتواند به درستی ویژگی‌های تصاویر را شناسایی کند.



شکل (۱) نمای کلی فرآیند تشخیص اشیاء در تصاویر ایکس‌ری کامیون‌ها با استفاده از مدل YOLOv8

شکل (۱) نمایی از آموزش مدل را نشان می‌دهد که تصاویر پس از پیش پردازش و تقسیم بندی به بخش های کوچکتر به مدل YOLOv8 داده می شود که دارای سه بخش مجزا است:

- ستون فقرات^{۱۰}: این بخش وظیفه استخراج ویژگی‌های تصویر ورودی را دارد. در شکل، لایه‌های P1 تا P5 نشان‌دهنده نقشه‌های ویژگی در سطوح مختلف هستند که از اطلاعات ساده تا پیچیده‌تر را شامل می‌شوند [۸، ۱۰].
- گردن^{۱۱}: بخش میانی یا به اصطلاح گردن، نقشه‌های ویژگی استخراج شده را با ترکیب اطلاعات چند مقیاسی (مانند P، P5 و P7) بهبود می‌بخشد. این کار دقت تشخیص اشیاء کوچک و بزرگ را افزایش می‌دهد [۱۱].
- سر: در این بخش، پیش‌بینی نهایی انجام می‌شود. خروجی شامل مختصات جعبه‌های مرزی، دسته‌بندی اشیاء و نمره اطمینان است [۱۰].

پس از آموزش مدل و شناسایی شبکه‌های مرزی مجدد این بخش‌ها به هم متصل می‌شوند تا شکل نهایی کامیون بازسازی شود.

^۹ Google colab

^{۱۰} Backbone

^{۱۱} Neck



۳- نتایج:

مدل آموزش دیده با استفاده از تصاویر پردازش شده و داده‌های برچسب گذاری شده، عملکرد قابل توجهی در تشخیص و طبقه بندی اشیاء نشان داد. معیارهای ارزیابی شامل دقت، بازیابی، امتیاز F_1 و میانگین دقت متوسط mAP^{12} (بودند mAP ، به عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی مدل های تشخیص اشیاء، با محاسبه میانگین مساحت زیر منحنی دقت - بازیابی برای تمامی کلاس ها به دست می آید. در این پژوهش از معیار $mAP@0.5$ استفاده شد که آستانه همپوشانی جعبه پیش بینی شده با جعبه واقعی را برابر ۵۰ درصد در نظر می گیرد [۳]. این آستانه به عنوان یک معیار استاندارد برای سنجش توانایی کلی مدل در شناسایی کلی اشیاء در بسیاری از کاربردها پذیرفته شده است [۲، ۷].

$$mAp = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N AP_i \quad (1)$$

در جدول (۲)، نتایج حاصل از ارزیابی مدل ارائه شده است. این نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در شناسایی اشیاء با ابعاد و پیچیدگی های مختلف بوده و قابلیت کاربرد عملی آن در محیط های واقعی را تأیید می کند.

جدول ۲: نتایج ارزیابی مدل

مقدار	معیار
۰.۸۸۲	دقت
۰.۹۳۱	بازیابی
۰.۹۰۵	امتیاز F_1
۰.۹۳۴	میانگین دقت متوسط ($@0.5$)

۴- بحث و نتیجه گیری:

این پژوهش به توسعه و ارزیابی مدلی مبتنی بر YOLOv8x برای شناسایی اشیاء در تصاویر اشعه ایکس محموله های ماشین های سنگین پرداخت. در این راستا، از تکنیک های پیش پردازش شامل حذف نویز، تبدیل تصاویر به مقیاس خاکستری، و تقسیم بندی تصاویر بزرگ به بخش های کوچک تر استفاده شد. تقسیم بندی تصاویر به مدل اجازه داد تا اشیاء کوچک تر و با جزئیات پیچیده را با دقت بیشتری شناسایی کند. پس از شناسایی اشیاء در بخش های مختلف، تصویر اصلی با استفاده از نتایج مدل بازسازی شد تا تمامی اطلاعات در یک نمای کلی ارائه شود. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی توانست در معیارهایی مانند میانگین دقت متوسط و نرخ بازیابی نتایج قابل توجهی برای شناسایی اشیاء با ابعاد مختلف ارائه دهد.

¹² Mean average precision



هرچند این پژوهش نتایج مثبتی در شناسایی اشیاء محموله‌های باری ارائه داد، اما محدودیت‌هایی نیز وجود داشت که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال، وجود مجموعه داده‌های متنوع از تصاویر امنیتی، به ویژه برای شناسایی اشیایی مانند اسلحه و سایر موارد ممنوعه، از اهمیت بالایی برخوردار است. گسترش و جمع‌آوری داده‌های بیشتر و متنوع‌تر می‌تواند به بهبود عملکرد مدل و افزایش دقت در شناسایی این موارد کمک کند. علاوه بر این، شناسایی دقیق مخزن سوخت کامیون‌ها می‌تواند در تحقیقات آینده به عنوان مبنایی برای تخمین حجم سوخت موجود در کامیون‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع می‌تواند به طور مؤثری در مدیریت و کنترل مشکلات مرتبط با قاچاق سوخت نقش داشته باشد. در مجموع، این پژوهش گامی مؤثر در راستای توسعه سیستم‌های هوشمند برای شناسایی، نظارت، و مدیریت محموله‌ها در محیط‌های امنیتی نظیر مرزها بوده و پایه‌ای برای تحقیقات آینده در این حوزه محسوب می‌شود.

۵- مراجع:

- [۱] J. Wu, X. Xu, and J. Yang, "Object detection and X-ray security imaging: A survey," *IEEE Access*, vol. ۱۱, pp. ۴۵۴۱۶-۴۵۴۴۱, ۲۰۲۳.
- [۲] T. Viriyasaranon, S.-H. Chae, and J.-H. Choi, "MFA-net: Object detection for complex X-ray cargo and baggage security imagery," *Plos one*, vol. ۱۷, no. ۹, p. e۰۲۷۲۹۶۱, ۲۰۲۲.
- [۳] M. Rafiei, J. Raitoharju, and A. Iosifidis, "Computer vision on x-ray data in industrial production and security applications: A comprehensive survey," *Ieee Access*, vol. ۱۱, pp. ۲۴۴۵۰-۲۴۷۷, ۲۰۲۳.
- [۴] S. Kolokytha *et al.*, "Creating a reference database of cargo inspection X-ray images using high energy radiographs of cargo mock-ups," *Multimedia Tools and Applications*, vol. ۷۷, pp. ۹۳۷۹-۹۳۹۱, ۲۰۱۸.
- [۵] T. W. Rogers, N. Jaccard, E. J. Morton, and L. D. Griffin, "Automated x-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise," *Journal of X-ray science and technology*, vol. ۲۵, no. ۱, pp. ۳۳-۵۶, ۲۰۱۷.
- [۶] K. Moshkbar-Bakhshayesh, H. Afarideh, and R. Azimirad, "Inspection of cargo using dual-energy X-ray radiography: A review," *Radiation Physics and Chemistry*, p. ۱۱۱۱۸۰, ۲۰۲۳.
- [۷] S. Akçay, M. E. Kundegorski, M. Devereux, and T. P. Breckon, "Transfer learning using convolutional neural networks for object classification within X-ray baggage security imagery," in *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, ۲۰۱۶, pp. ۱۰۵۷-۱۰۶۱: IEEE.
- [۸] G. Seyfi, E. Esme, M. Yilmaz, and M. S. Kiran, "A literature review on deep learning algorithms for analysis of X-ray images," *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol. ۱۵, no. ۴, pp. ۱۱۶۵-۱۱۸۱, ۲۰۲۴.



- [۹] J. Wu and X. Xu, "EslaXDET: A new X-ray baggage security detection framework based on self-supervised vision transformers," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. ۱۲۷, p. ۱۰۷۴۴۰, ۲۰۲۴.
- [۱۰] J. Terven, D.-M. Córdova-Esparza, and J.-A. Romero-González, "A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov^۱ to yolov^۸ and yolo-nas," *Machine Learning and Knowledge Extraction*, vol. ۵, no. ۴, pp. ۱۶۸۰-۱۷۱۶, ۲۰۲۳.
- [۱۱] A. Vijayakumar and S. Vairavasundaram, "Yolo-based object detection models: A review and its applications," *Multimedia Tools and Applications*, pp. ۱-۴۰, ۲۰۲۴.



تعیین تجربی ضرایب GEB برای آشکارساز $(3 \times 3 \times 0)$ BGO در بازه انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰۰۰۰ keV (کد مقاله: ۱۰۸۳)

نازیلا دیوانی^{۱*}، پرویز قربانی^۲، اسمعیل بیات^۱

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند - ایران

۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران - ایران

چکیده:

امروزه کدهای شبیه سازی، بخصوص کد *MCNP*، در انجام محاسبات هسته ای و پیش بینی رفتار سامانه های مورد استفاده در زمینه کاربرد پرتوها بسیار گسترده و دقیق شده اند. با این حال، جهت دریافت پاسخ مناسب از این کدها، لازم است برخی پارامترها بصورت تجربی تعیین شده و در کد وارد شوند تا نتایج حاصل از محاسبات، بیشترین همخوانی را با نتایج تجربی داشته باشند. در آشکارساز سوسوزن *BGO*، مجموعه‌ای از انواع فرآیندهای احتمالاتی و نویز باعث پهن شدگی گوسی شکل قله تمام انرژی می‌شوند که جهت دریافت پاسخ مناسب از شبیه سازی، لازم است این میزان پهن شدگی بصورت ضرایبی (*GEB*) در شبیه سازی وارد شود. در این تحقیق با استفاده از چشمه‌های رادیوایزوتوپی و نیز گاما‌های ناشی از فعالسازی نوترونی، ضرایب *GEB* برای طیف وسیعی از انرژی گاما از انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰ MeV تعیین گردید.

کلمات کلیدی: ضرایب *GEB*، شبیه سازی مونت کارلو، کد *MCNP*، آشکارساز *BGO*

Experimental determination of GEB coefficients for $(3 \times 3 \times 0)$ BGO detector in the energy range of ۱۰۰ keV to ۱۰۰۰۰ keV

Divani, Nazila^{۱*}; Ghorbani, Parviz^۲; Bayat, Esmaeil^۱

^۱. University of Birjand, Faculty of Sciences, Department of Physics

^۲. Azad University of Sciences & researches Branch, Faculty of Nuclear Engineering

Abstract:

Nowadays, simulation codes, especially MCNP code, have become very extensive and accurate in performing nuclear calculations and predicting the behavior of systems used in the field of radiation applications. However, in order to obtain an appropriate response from these codes, it is necessary to determine some parameters experimentally and enter them into the code so that the results obtained from the calculations are most consistent with the experimental results. In the BGO scintillation detector, a set of probabilistic processes and noise causes a Gaussian broadening of the full energy peak, which in order to obtain an appropriate response from the simulation, it is necessary to enter this broadening in the form of coefficients (GEB) in the simulation. In this research, using radioisotope sources as well as gammas resulting from neutron activation, GEB coefficients were determined for a wide range of gamma energies from ۱۰۰ keV to ۱۰ MeV.

Keywords: GEB coefficients, Monte Carlo simulation, MCNP code, BGO detector



۱- مقدمه:

هدف از تحلیل طیف اشعه گاما، تعیین دقیق انرژی و شدت فوتون‌های گسیل شده از چشمه است [۱]. در این میان آشکارساز BGO برای آشکارسازی فوتون گاما بازده نسبتاً بالایی دارد که علت آن چگالی بالا 7.13 g/cm^3 و ابعاد نسبتاً بزرگ آن می باشد. بطور کلی، تابع پاسخ و بازده ذاتی آشکارسازهای دارای قطرها و ارتفاع‌های مختلف به دو روش تحلیلی و شبیه‌سازی مونت کارلو، برای فواصل مختلف از آشکارساز محاسبه و مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. با افزایش احتمال برهمکنش بین تابش فرودی و ماده‌ی آشکارساز، بازده آشکارساز افزایش می‌یابد که این احتمال متناسب با سطح مقطع اندرکنش‌ها با آشکارساز، چگالی ماده و ابعاد آشکارساز است. اگر یک باریکه موازی از فوتون‌های با انرژی E که طول L را در آشکارساز می‌پیمایند، در نظر گرفته شوند، احتمال اینکه یک فوتون حداقل یک برهمکنش در آشکارساز داشته باشد برابر $1 - e^{-\mu(E)L}$ است که در آن $\mu(E)$ ضریب تضعیف خطی فوتون‌های با انرژی E در ماده‌ی آشکارساز است. چنانچه برای تولید یک تپ قابل آشکار شدن یک برهمکنش کافی باشد، بازده ذاتی آشکارساز از رابطه $\epsilon_i(E) = 1 - e^{-\mu(E)L}$ قابل محاسبه است. بازده هندسی $\epsilon_g(E)$ نیز بستگی به ابعاد آشکارساز و فاصله چشمه از آشکارساز دارد و با در نظر گرفتن پیکربندی هندسی تجربی بصورت تحلیلی قابل محاسبه است. یکی دیگر از روش‌هایی که برای محاسبه بازده آشکارساز با دقت بالا مورد استفاده می باشد روش مونت کارلو و استفاده از کد محاسباتی MCNP که به دو طریق: (۱) بدون توزیع انرژی گاوسی یا به عبارت دیگر با طیف ایده آل آشکارساز، (۲) با داشتن توزیع انرژی گاوسی و لحاظ کردن قدرت تفکیک انرژی واقعی آشکارساز، مقدور خواهد بود که البته روش دوم دقیق تر است [۲].

یکی از روش‌های آنالیز طیف گاما بخصوص در PGNA، روش تمام طیف^{۱۳} می باشد. در این روش لازم است کتابخانه وسیعی از طیف‌های تجربی نمونه‌های مختلف تهیه شوند که این امر عملاً بسیار دشوار و زمانبر است. اما با شبیه سازی یک چیدمان نوعی، طیف نمونه‌های مختلف با اعمال پهن شدگی، بطور مناسب حاصل شده و بدین ترتیب می‌توان کتابخانه‌ای از طیف‌های گامای نمونه‌های گوناگون را با استفاده از شبیه‌سازی آماده نمود. همچنین کتابخانه این طیف‌ها در آموزش شبکه های عصبی جهت نگارش نرم افزار آنالیز طیف نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

در کد شبیه سازی MCNP^{۱۴}، برای داشتن پاسخ آشکارساز که نزدیک به شکل واقعی طیف آشکارساز باشد باید از تابعی بنام GEB^{۱۵} در کد استفاده شود که نیاز به تعیین سه ضریب است که برای هر نوع آشکارساز و هر گونه بازه انرژی این ضرایب به روش تجربی بدست می آیند. در کد MCNP پهن شدگی گاوسی به شکل پهنای نیم بیشینه ($FWHM^{16}$) با رابطه $a + b\sqrt{E} + cE^2$ به انرژی مربوط می‌باشد. لذا، با اندازه‌گیری‌های تجربی برای چندین چشمه گامای استاندارد در محدوده انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰ MeV پارامترهای ثابت a ، b و c در رابطه غیرخطی مذکور برای آشکارسازی با ابعاد $3 \times 3 \times 0.3$ محاسبه می‌شوند و سپس مقدار FWHM مناسب برای آشکارساز در هر انرژی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش تلاش شده است به روش تجربی ضرایب GEB برای آشکارساز BGO^{17} با قطر و طول سه اینچ در بازه انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰۰۰۰ keV با استفاده از چشمه های گامای رادیوایزوتوپی و گاما‌های آنی^{۱۸} PGNA تعیین شوند [۳].

^{۱۳} Full spectrum analysis

^{۱۴} MCNP is a general-purpose Monte Carlo N-Particle code that can be used for neutron, photon, electron, or coupled neutron/photon/electron transport.

^{۱۵} Gaussian Energy Broadening Function of the Detector.

^{۱۶} Full width at half maximum

^{۱۷} BGO (Bi_2GeO_{11}) is a high Z, high-density scintillation material. Due to the high atomic number of bismuth (۸۳) and the material's high density of 7.13 g/cm^3 , BGO is a very efficient gamma-ray absorber.

^{۱۸} Prompt gamma neutron activation analysis



۲- روش کار:

برای توضیح چگونگی تعیین تجربی ضرایب GEB برای آشکارسازهای BGO این نکات قابل توجه است که در طیف‌های تجربی آشکارسازهای سوسوزن، به دلایلی مانند:

- توزیع پواسونی تعداد فوتون تولیدی در کریستال با جذب یک گامای تک انرژی
- نوسانات آماری در جمع آوری فوتون‌ها روی فوتوکاتد لامپ PMT
- نوسانات آماری در تولید فوتو الکترون در فوتوکاتد
- نوسانات آماری در جمع آوری الکترون از فوتوکاتد و تکثیر آن در داینودها
- نویزهای الکترونیکی و جریان در تاریکی لامپ PMT

داده‌ها دارای توزیع گاوسی شکل برای هر خط انرژی می‌باشند. کد MCNP قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی منجر به این پهن شدگی نیست. اما می‌توان با استفاده از روش‌های برازش و استفاده از داده‌های تجربی، این پهن شدگی را در ورودی کد با کارت FT8 GEB روی طیف اعمال نمود. بدین ترتیب در انتهای تاریخچه ترابرد ذره، میزان نور تولید شده توسط نمونه برداری از طیف گاوسی پهن می‌گردد [۳]:

$$f(E) = C e^{-(2\sqrt{\ln 2}(E-E_0)/FWHM)^2} \quad (1)$$

که E انرژی پهن شده، E_0 انرژی بدون پهن شدگی تالی، C ثابت بهنجارش، و FWHM پهنای گاوسی می‌باشند.

FWHM وابسته به انرژی (E (MeV)) و توسط ضرایب a، b و C مشخص می‌شود:

$$FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (2)$$

پارامترهای a، b و C وابسته به نوع و ابعاد آشکارساز با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی تعیین می‌گردند [۴ و ۵].

برای چیدمان این آزمایش از آشکارساز BGO (Ø3×3) ساخت شرکت Scionix استفاده شده است که یک آشکارساز گاما از نوع سوسوزن‌های غیرآلی با کریستال اکسید ژرمنات بیسموت با ابعاد سه در سه اینچ است که برای عملکرد خوب در محدوده نسبتاً وسیعی از دما و با چگالی و عدد اتمی بالای محیط سوسوزنی آن برای آشکارسازی و طیف‌نگاری پرتو گاما بسیار مناسب است. از مشخصه‌های مطلوب یک سوسوزن، قدرت جذب پرتو گاما، نورخروجی زیاد، طول موج مناسب نور گسیلیده و شفافیت سوسوزن برای تابش خود است. این آشکارساز دارای تیوب فوتو-مولتی‌پلایر مدل Hamamatsu R1306-1307^{۱۹} در بازه ولتاژ کار ۴۵۰ تا ۱۲۰۰ ولت و قدرت تفکیک کمتر از ده درصد در انرژی ۶۶۲ KeV^{۲۰} است و برای حفاظت از آثار میدان مغناطیسی با μ -metal شیلد شده است [۷ و ۶]. بخش نخست ثبت طیف‌های تجربی آشکارساز BGO با استفاده از چشمه‌های رادیوایزوتوپی می‌باشد. بدین منظور چشمه‌های ^{241}Am ، ^{152}Eu ، ^{22}Na و ^{137}Cs با اکتیویته حدود $1\mu\text{Ci}$ در هندسه شکل ۱ قرار گرفت و طیف آنها و همچنین تابش زمینه ناشی از (^{208}Tl ، ^{40}K) مطابق شکل ۲ ثبت گردید.

جهت ثبت طیف PGNAA مواد مختلف، نمونه‌های یک لیتری خالص از اسید سولفوریک (H_2SO_4)، اسید هیدروفلوریک (HF)، اسید فسفریک (H_3PO_4)، هیپوکلریت سدیم (NaClO)، آب دوبار تقطیر (H_2O)، کلروفرم (CHCl_3) و اسید آکریلیک

^{۱۹} <https://www.hamamatsu.com>

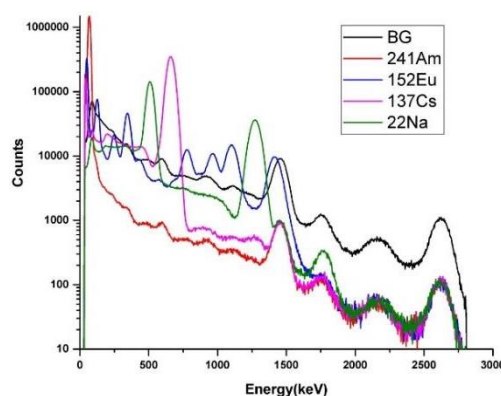
^{۲۰} BGO Resolution @ ۶۶۲ KeV: <۱۰٪



($C_3H_4O_2$) تهیه شد. این نمونه‌ها در چیدمان مطابق شکل ۳ و شکل ۴ که مدار طیف‌نگاری را نشان می‌دهد، قرار داده شده و با استفاده از چشمه ^{252}Cf با اکتیویته تقریبی 10 mCi طیف PGNAA آنها طی 3600 ثانیه مطابق شکل ۵ ثبت گردید. زمان ثبت طیف‌ها 3600 ثانیه و زمان مرده سیستم آشکارسازی بین 3 الی 4 درصد در نظر گرفته شده است [۸]. همچنین، از نمونه‌های تهیه شده یک لیتری اسید سولفوریک، اسید فسفریک، اسید فلریدریک، کلروفرم، آب، و اسید آکریلیک ساخت شرکت مرک^{۲۱} استفاده شده است.



شکل (۱) چیدمان هندسه ثبت طیف تجربی چشمه‌های رادیوایزوتوپی مختلف ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{22}Na و ^{137}Cs با اکتیویته حدود $1\text{ }\mu\text{Ci}$ برای آشکارساز $(3\times3\text{ BGO}(\emptyset)$

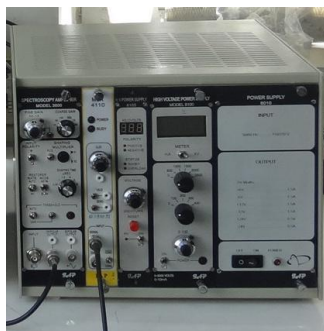


شکل (۲) طیف گامای حاصل از چشمه‌های رادیوایزوتوپی مختلف ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{22}Na و ^{137}Cs با اکتیویته حدود $1\text{ }\mu\text{Ci}$ برای آشکارساز $(3\times3\text{ BGO}(\emptyset)$

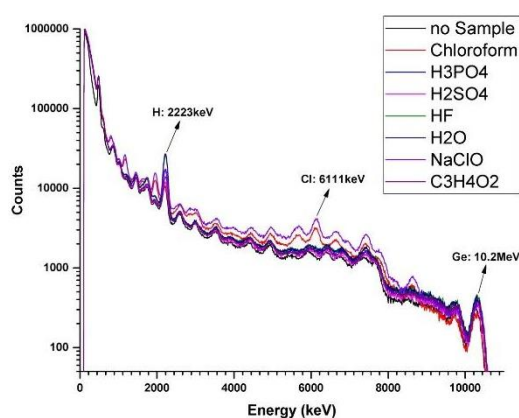


شکل (۳) چیدمان تجربی ثبت طیف PGNAA نمونه‌های مختلف با آشکارساز $(3\times3\text{ BGO}(\emptyset)$

^{۲۱} Merck: <https://www.merckgroup.com>



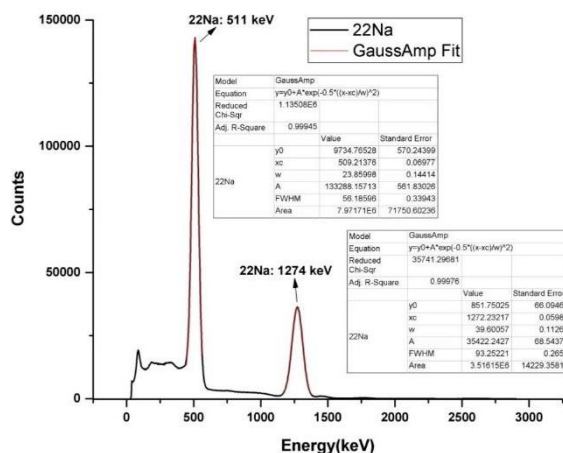
شکل (۴) ماژول های الکترونیک جهت طیف نگاری PGNAO با استفاده از چشمه ^{252}Cf



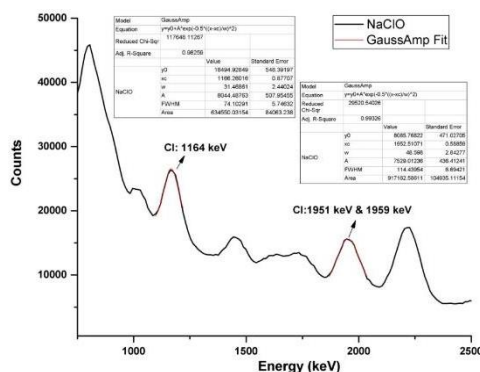
شکل (۵) طیف PGNAO نمونه های مختلف با استفاده از چشمه ^{252}Cf با اکتیویته تقریبی 10 mCi طی زمان 3600 ثانیه

۳- نتایج:

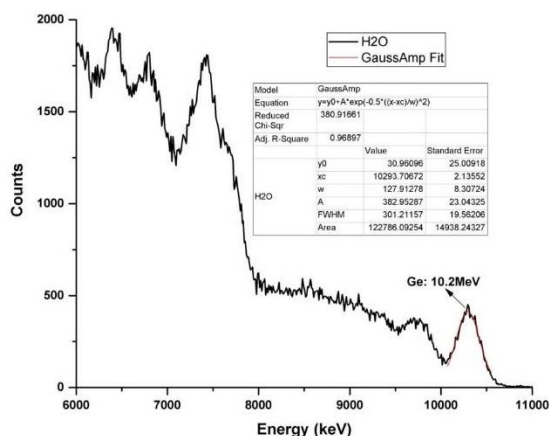
با توجه به طیف‌های تجربی حاصل از چشمه های رادیوایزوتوپی و گامای آبی نمونه های مختلف، برخی قله‌های شاخص مطابق شکل ۶، شکل ۷ و شکل ۸ انتخاب گردید و FWHM آنها مطابق جدول ۱ تعیین شد. سپس نمودار FWHM بر حسب انرژی با استفاده از این نتایج در نرم‌افزار Origin رسم شده و تابع رابطه ۲ روی آن برازش گردید که در شکل ۹ نمایش داده شده است [۹ و ۱۰]. بدین ترتیب مقادیر ضرایب GEB برای آشکارساز BGO در محدوده انرژی 100 keV تا 10000 keV بصورت تجربی مقادیر $a=-0.0018$ ، $b=0.0795$ و $c=0.0397$ تعیین شدند.



شکل (۶) طیف گامای ناشی از چشمه ^{22}Na به همراه برازش گاوسی روی قله های آن برای آشکارساز BGO($3\times 3\times 3$)



شکل (۷) طیف PGNAA نمونه NaClO به همراه برازش گاوسی روی قله های کلر برای آشکارساز BGO(Ø3×3)



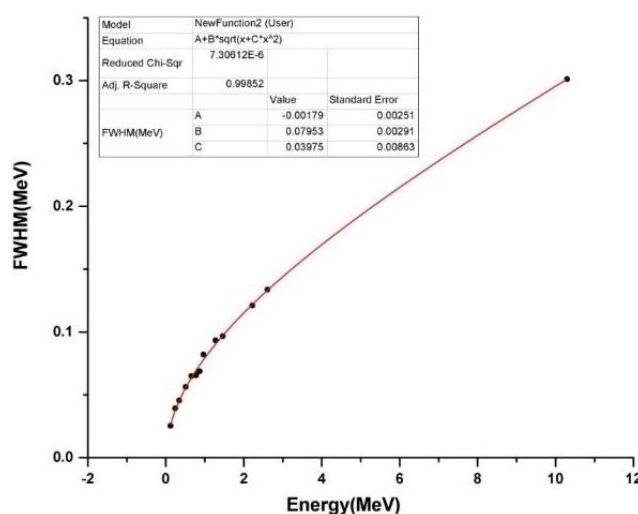
شکل (۸) طیف PGNAA نمونه H₂O به همراه برازش گاوسی روی قله ژرمانیم برای آشکارساز BGO(Ø3×3)

جدول ۱: قله های انتخاب شده برای تعیین تجربی ضرایب GEB برای آشکارساز BGO(Ø3×3)

Enregy (keV)	FWHM (keV)	Error	Ref.
۱۲۲	۲۵.۳۳	۰.۴۳	^{۱۵۲} Eu
۲۴۴.۷	۳۹.۱۳	۰.۹۱	^{۱۵۲} Eu
۳۴۴.۳	۴۵.۶۱	۰.۲۲	^{۱۵۲} Eu
۵۱۱	۵۶.۱۸	۰.۳۴	^{۲۲} Na
۶۶۱.۶	۶۴.۸۵	۰.۱۹	^{۱۳۷} Cs
۷۷۹	۶۵.۴۵	۱.۵۲	^{۱۵۲} Eu
۸۶۷.۴	۶۸.۶۱	۱.۹۳	^{۱۵۲} Eu
۹۶۴	۸۲.۰۱	۲.۱۷	^{۱۵۲} Eu



۱۲۷۴.۵	۹۳.۲۵	۰.۲۶	^{22}Na
۱۴۶۰.۵	۹۶.۶	۱.۹۳	BG
۲۲۲۳	۱۲۰.۹۴	۲.۷	PGNAA-H ₂ O
۲۶۱۴	۱۳۳.۶۹	۳.۳۳	BG
۱۰۳۰۰	۳۰۱.۲۱	۱۹.۵۶	PGNAA-H ₂ O



شکل (۹) برازش روی داده های نمودار FWHM بر حسب انرژی جهت تعیین ضرایب GEB آشکارساز BGO(Ø3×3)

۴- بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از روش آنالیز تمام طیف، طیف نمونه‌های مختلف ضمن اعمال پهن شدگی، حاصل شد و مقادیر ضرایب GEB برای آشکارساز BGO با ابعاد Ø3×3 در محدوده انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰۰۰۰ keV، بصورت تجربی $a=-$ و $c=0.0397$ تعیین شدند. این پارامترها برای اولین بار به صورت تجربی برای آشکارساز BGO در محدوده انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۰ MeV تعیین شده‌اند. برای مقایسه، نتایج چاپ شده مشابهی تا زمان نگارش این مقاله یافت نشد.

۵- مراجع:

- [۱] G. E. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, ۳rd edition, ۲۰۰۰.
- [۲] D. B. Pelowitz, "MCNPX User's Manual, Version ۲,۶,۰" Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-۰۷-۱۴۷۳, ۲۰۰۸.
- [۳] C.M. Salgado, L.E.B. Brandão, R. Schirru, C.M.N.A. Pereira, C.C. Conti, "Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNP-X code", Progress in Nuclear Energy ۵۹ (۲۰۱۲) ۱۹-۲۵.



- [۴] O. Litaize, "Simulation of a NE_{213} g-response function using an improved multi-parameter minimization procedure", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A ۵۸۰ (۲۰۰۷) ۹۸-۱۰۱.
- [۵] J. Rodenas, S. Gallardo, J. Ortiz, "Comparison of a laboratory spectrum of $Eu-^{152}$ with results of simulation using the MCNP code", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A ۵۸۰ (۲۰۰۷) ۳۰۳-۳۰۵.
- [۶] E. Bayat, N. Divani-Vais, M.M. Firoozabadi, N. Ghal-Eh, "A comparative study on neutron-gamma discrimination with NE_{213} and UGLLT scintillators using zero-crossing method", Radiat. Phys. Chem. ۸۱, ۲۱۷-۲۲۰.
- [۷] E. Bayat, H. Afarideh, F. Abbasi Davani, N. Ghal-Eh, "A quality survey on different shielding configurations of gamma ray detector used with a portable PGNA system", Radiation Physics and Chemistry ۱۲۰ (۲۰۱۶) ۷-۱۱.
- [۸] E. Eftekhari Zadeh, S. A. H. Fegghi, E. Bayat, G. H. Roshani, "Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the Range of ۴۰ keV to ۱,۴۶ MeV", Hindawi Publishing Corporation Journal of Experimental Physics Volume ۲۰۱۴, Article ID ۶۲۳۶۸۳, ۴ pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/623683>.
- [۹] ORIGINLAB, "Data Analysis and Graphing Software", <http://www.originlab.com/>.
- [۱۰] P.H.G.M. Hendriks, M. Maucec, R.J. de Meijer, "MCNP modelling of scintillation-detector g-ray spectra from natural radionuclides", Applied Radiation and Isotopes ۵۷ (۲۰۰۲) ۴۴۹-۴۵۷.



ارزیابی دزیمتری قرص‌های TLD کلسیم فسفات تولیدی به روش‌های تف جوشی SPS و PLS

(کد مقاله: ۱۰۹۵)

رفیعیان، محمد^۱، دانشور، حمیده^{۲*}

^۱. شرکت پارس ایزوتوپ

^۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

در این پژوهش، رفتار دزیمتری قرص‌های ترمولومینسانس کلسیم فسفات شامل هیدروکسی‌آپتایت و بتاتری کلسیم فسفات بررسی شد. این قرص‌ها با استفاده از دو روش تف‌جوشی بدون فشار (PLS) و سینترینگ با پلاسمای جرقه‌ای (SPS) تولید شدند. نتایج نشان داد که قرص‌های تولید شده از پودر تجاری در هر دو روش دارای رفتار دزیمتری مشابهی بودند، اما قرص‌های حاصل از پودرهای سنتزی تفاوت‌های معناداری از نظر محدوده خطی و میزان پاسخ دزیمتری نشان دادند. آزمون‌های محوشدگی نشان داد که قرص‌های تولید شده به روش PLS نسبت به روش SPS در حفظ پاسخ دزیمتری بهتر عمل می‌کنند. همچنین آزمون تکرارپذیری بیانگر آن بود که روش PLS پراکندگی کمتری در نتایج ایجاد می‌کند و از نظر تکرارپذیری پایدارتر است. به طور کلی، روش PLS به دلیل عملکرد مناسب‌تر، هزینه پایین‌تر و دسترسی آسان‌تر به عنوان روش بهینه برای تولید قرص‌های کلسیم فسفات پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: ترمولومینسانس، کلسیم فسفات، تف جوشی، PLS و SPS

Dosimetric evaluation of TLD calcium phosphate pellets produced by SPS and PLS sintering methods

Rafieian, Mohammad^۱, Daneshvar, Hamideh^{۲*}

^۱. Pars Isotope Company

^۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Applications Research School

Abstract:

In this study, the dosimetric behavior of thermoluminescent calcium phosphate pellets including hydroxyapatite and beta-tricalcium phosphate was investigated. These pellets were produced using two methods: pressure less sintering (PLS) and spark plasma sintering (SPS). The results showed that pellets produced from commercial powders had similar dosimetric behavior in both methods, but pellets produced from synthetic powders showed significant differences in terms of linear range and dosimetric response. The fading tests showed that pellets produced by the PLS method performed better than the SPS method in maintaining the dosimetric response. Also, the repeatability test indicated that the PLS method produced less scatter in the results and was more stable in terms of repeatability. In general, the PLS method is recommended as the optimal method for producing calcium phosphate pellets due to its better performance, lower cost, and easier accessibility.

Key words: Thermoluminescence, calcium phosphate, sintering, PLS and SPS



۱ - مقدمه:

فرآیند پرتودهی در طول ۵۰ سال گذشته به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. از پرکاربردترین حوزه‌های پرتوفاوری، در زمینه محصولات کشاورزی است که به بهینه‌سازی خواص، دفع آفات، و افزایش زمان انبارمانی محصولات کمک می‌کند [۲]. اگر میزان دز جذب شده در نمونه کمتر از مقدار مشخص شده باشد، کارایی لازم را نخواهد داشت و در صورت بیشتر بودن دز، اثرات مخربی به همراه خواهد داشت. بنابراین، استفاده از سیستم‌های دزیمتری با دقت بالا ضروری است [۳]. دزیمتری وسیله‌ای برای تمایز بخشی و طبقه‌بندی تجهیزات، تایید پذیرش پرتوگیری و کنترل عملکرد است که در اختیار کاربر قرار می‌گیرد [۴]. در محدوده $10 - 1000 \text{ Gy}$ که مخصوص دزیمتری محصولات کشاورزی است، به دلیل کمبود گزینه‌های موجود، نیاز به یک دزیمتر قابل اعتماد و ارزان با قابلیت ساخت آسان و قرائت راحت وجود دارد [۵]. ترمولومینسانس (TL) که نور گسیل‌شده از یک ماده عایق یا نیمه‌رسانا است، به عنوان روشی رایج برای دزیمتری پرتوهای یون‌ساز مانند ایکس و گاما شناخته شده است [۶]، [۷]، [۸]. فسفات‌ها و به طور خاصتر هیدروکسی اپتایت و بتاتری کلسیم فسفات به عنوان سرامیک‌های جایگزین استخوانی دارای کاربردهای پزشکی هستند و اخیراً از آنها در دزیمتری گذشته نگر استفاده شده است [۹]، [۱۰]. همچنین این مواد می‌تواند میزبان مناسبی برای جایگزینی ناخالصیها بوده و برای کاربردهای فوتولومینسانس و ترمولومینسانس استفاده شود [۱۱]. اخیراً چگالش یا متراکم کردن به روشهای سینترینگ بدون فشار^{۲۲} و فرآیندهای سینترینگ با پلاسمای جرقه‌ای^{۲۳} توسعه زیادی پیدا کرده است [۱۲]. اسپارک پلازما سینترینگ (SPS)، روشی جهت سینترینگ یا تفجوشی سریع مواد پودری است. این فرآیند با حرارت دادن مواد پودری در داخل کوره و در زیر نقطه ذوب انجام میشود. دمای کاری (۲۰۰ تا ۲۴۰۰ درجه سانتیگراد) بوده که معمولاً ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد پایینتر از روشهای معمول سینترینگ است، از این رو SPS به عنوان یک فناوری دمای پایین شناخته میشود. تولید مواد به کمک SPS در مدتی کوتاه، حدود ۵ تا ۲۵ دقیقه تکمیل میشود [۱۳]، [۱۴]. سینترینگ یا تفجوشی بدون فشار عبارت است از سینترینگ پودر فشرده (گاهی اوقات در دماهای بسیار بالا بسته به پودر) بدون اعمال فشار است [۱۵]. هدف اصلی کار در این، مقایسه پاسخ دزیمتری قرص‌های سرامیکی کلسیم فسفات ساخته شده به روش SPS و PLS است.

۲ - روش کار:

در این کار دو ماده هیدروکسی اپتایت (H) و بتاتری کلسیم فسفات (B) برای تبدیل به قرص و بررسی دزیمتری ترمولومینسانس انتخاب شد. این ترکیبها به روش حالت جامد سنتز (S) شدند و به صورت تجاری مرک (M) نیز خرید صورت گرفت. برای تبدیل این پودرها به قرص از دو روش شامل تف جوشی بدون فشار (PLS) و پلاسمای جفت شده القایی (SPS) استفاده شد. قرائت نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه قرائتگر مدل هارشا ۴۵۰۰ در محدوده دمایی از 50°C تا 350°C با آهنگ گرمایی $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ انجام شده است. پرتودهی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه گاماسل کبالت ۶۰ مدل GC-۲۲۰ ساخت NORDION انجام شده است [۱۶]. محدوده پرتودهی از $20 - 800 \text{ Gy}$ بوده است.

در تهیه ماده هیدروکسی اپتایت و بتاتری کلسیم فسفات به روش حالت جامد، از مواد کلسیم نیترات $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ، دی آمونیوم فسفات $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ و سدیم بی کربنات (NaHCO_3) به عنوان مواد اولیه استفاده شد. برای حذف محصولات جانبی تولید شده، با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ با 3000 rpm به مدت ۱۵ min شستشو به ترتیب با استفاده از اتانول، آب دی یونیزه و آب مقطر انجام میشود. ماده در خشک‌کن^{۲۴} به مدت ۶ ساعت در دمای 80°C قرار میگیرد تا به طور کامل

^{۲۲} pressureless sintering

^{۲۳} spark plasma sintering

^{۲۴} Dryer cabinet



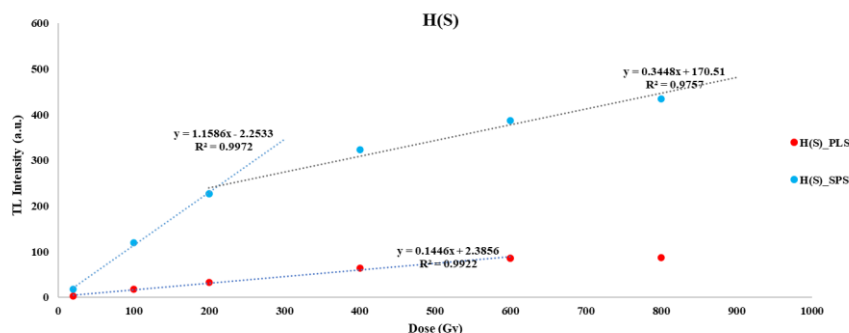
خشک شود [۱۷]، سپس ماده هیدروکسی اپتایت در دمای 600°C و بتاتری کلسیم فسفات در دمای 900°C به مدت ۳ ساعت کلسینه شده است.

برای تبدیل پودر به قرص در روش SPS از دستگاه موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی کرج استفاده شده است. فشار اعمال شده 40 MPa و دما برابر با 685°C می‌باشد برای حذف ماده گرافیتی اطراف قرص سمباده با شماره‌های مختلف (به ترتیب ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰) به نمونه اعمال و سپس در انتهای کار از نمد استفاده می‌شود. برای برش قرص‌ها به قطر $1/5\text{ cm}$ و ضخامت 1 mm از تجهیزات موجود در آزمایشگاه مرجع زیست مواد دندان‌دانی موجود در پژوهشگاه علوم دندانپزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران استفاده شده است.

برای تولید قرص با روش PLS باید بتوان آنها را بصورت یک پودر گرانوله تبدیل کرد. تهیه قرص به این روش به ترتیب شامل تهیه محلول PVA، آغشته کردن پودر به این چسب آلی، ماندگاری پودر و چسب در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته یا به عبارتی پیروازی، الک کردن و قرص زنی با استفاده از پرس هیدرولیکی است. ابزارهای مورد نیاز برای این کار سنبه ماتریس است. مقدار تقریبی ضخامت برای تولید این قرص‌ها تقریباً برابر با 1 mm می‌باشد. پس از تهیه قرص‌ها با استفاده از روش سینترینگ بدون فشار و پرس هیدرولیکی، باید تحت عملیات حرارتی قرار بگیرد. عملیات حرارتی در درجه اول برای حذف چسب آلی PVA انجام می‌شود. این کار در دمای 450°C و با زمان نگهداری (holding time) برابر با ۱ ساعت انجام می‌شود برای نمونه‌های کلسیم فسفات، دمای نهایی 600°C و برای ماده بتاتری کلسیم فسفات برابر با 800°C می‌باشد.

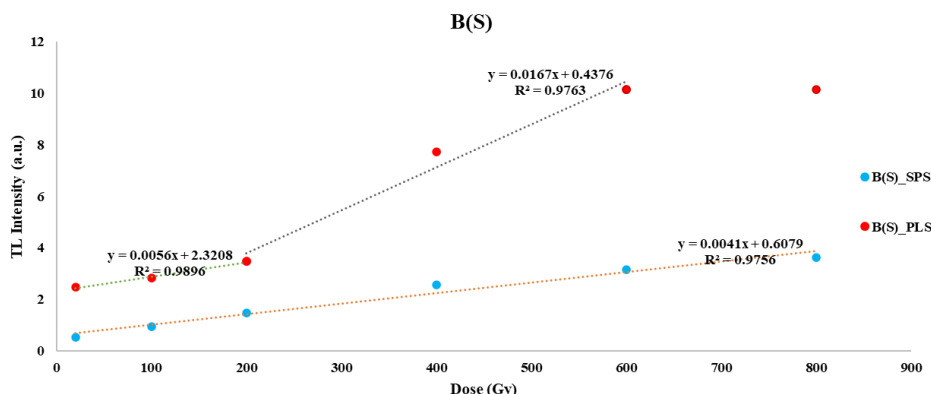
۳- نتایج:

در این قسمت نتایج دزیمتری قرص‌های ساخته شده نشان داده شده است. نتایج بررسی دزیمتری نمونه‌های قرص (H(S) به دو روش SPS و PLS در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است مقدار پاسخ قرص حاصل از روش SPS نسبت به روش PLS بیشتر است. اما محدوده خطی بودن پاسخ در نمونه PLS بیشتر است. قرص (H(S) به روش PLS از $20-600\text{ Gy}$ خطی است؛ اما قرص (H(S) به روش SPS در دو بازه مجزا از $20-200\text{ Gy}$ و $200-800\text{ Gy}$ دارای رفتار خطی است.



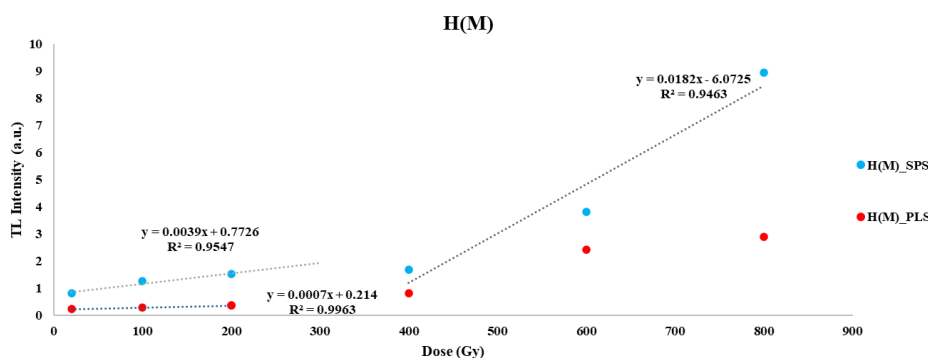
شکل (۱) منحنی دز پاسخ قرص‌های (H(S)

شکل (۲) نتایج بررسی دزیمتری قرص (B(S) به دو روش SPS و PLS را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است مقدار پاسخ قرص حاصل از روش PLS نسبت به روش SPS بیشتر است. اما محدوده خطی بودن پاسخ در نمونه SPS بیشتر است. نمونه (B(S) به روش SPS از $20-800\text{ Gy}$ خطی است؛ اما قرص (B(S) به روش PLS در دو بازه مجزا از $20-200\text{ Gy}$ و $200-600\text{ Gy}$ دارای رفتار خطی است.



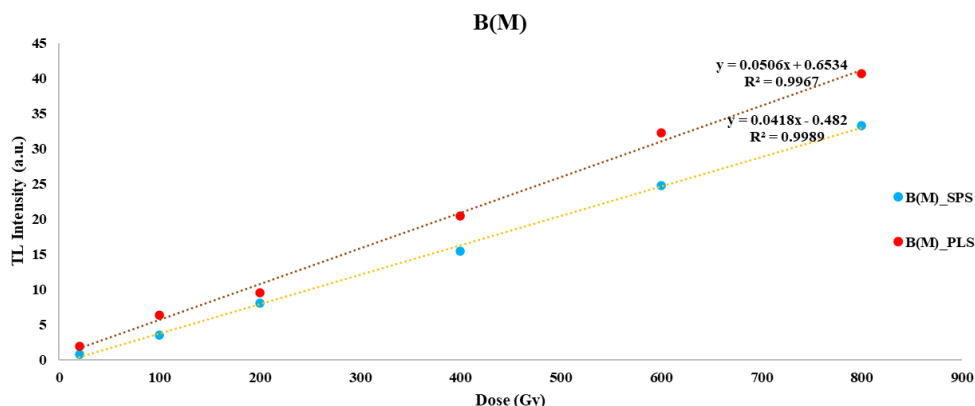
شکل (۲) منحنی دز پاسخ قرص‌های B(S)

شکل (۳) نتایج دزیمتری قرص H(M) ساخته شده به دو روش PLS و SPS را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، این دو قرص در محدوده دز ۲۰-۲۰۰ Gy برای هر دو روش دارای پاسخ خطی هستند؛ اما در بازه دز بالاتر رفتار خطی ندارند. این دو نمونه به جز در دز ۸۰۰ Gy دارای پاسخ تقریباً یکسانی به لحاظ دزیمتری ترمولومینسانس هستند.



شکل (۳) منحنی دز پاسخ قرص‌های H(M)

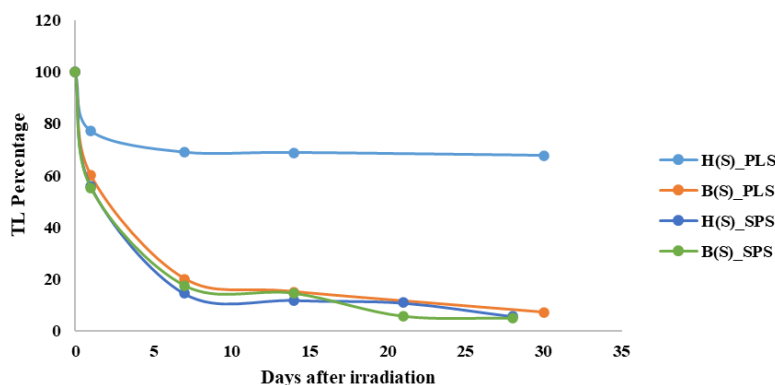
شکل (۴) نتایج پاسخ دزیمتری قرص‌های B(M) ساخته شده به دو روش PLS و SPS را نشان می‌دهد همانطور که در این شکل نشان داده شده است، نتایج برای هر دو قرص دارای رفتار تقریباً مشابهی بوده و روند خطی بودن نمودار دز پاسخ یکسان است و هر دو نمونه در بازه ۲۰-۸۰۰ Gy خطی هستند. قرص ساخته شده به روش PLS در دزهای بالاتر دارای پاسخ بیشتری است.



شکل (۴) منحنی دز پاسخ قرص‌های B(M)

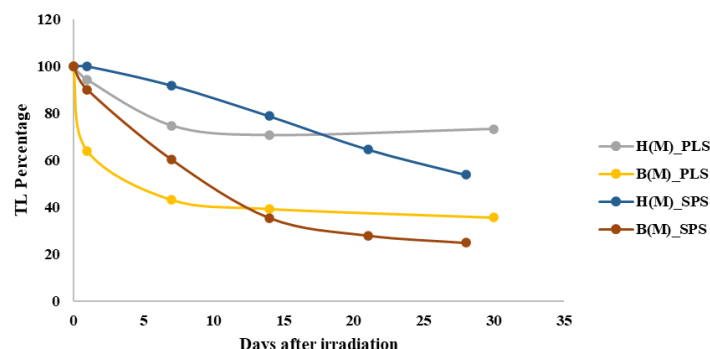
در کل نتایج پاسخ دزیمتری نشان می‌دهد برای قرص‌های حاصل از سنتز پاسخ دزیمتری به روش تبدیل به قرص وابسته است، اما برای قرص‌های تولیدی از پودر تجاری، پاسخ دزیمتری تقریباً یکسان بوده و به لحاظ محدوده خطی، دارای رفتار مشابهی هستند.

آزمون محوشدگی در یک بازه زمانی تقریباً یک ماهه مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها در دز ۴۰۰ Gy پرتودهی شده و در بازه زمانی مورد بررسی در جای تاریک نگهداری شده‌اند. شکل (۵) نتایج محوشدگی قرص‌های حاصل از سنتز به هردو روش PLS و SPS را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، به غیر از نمونه H(S) به روش PLS باقی قرص‌های سنتز شده دارای پاسخ محوشدگی مناسبی نیستند و در بازه زمانی تقریباً یک ماهه بیش از ۹۰ درصد پاسخ خود را از دست می‌دهند.



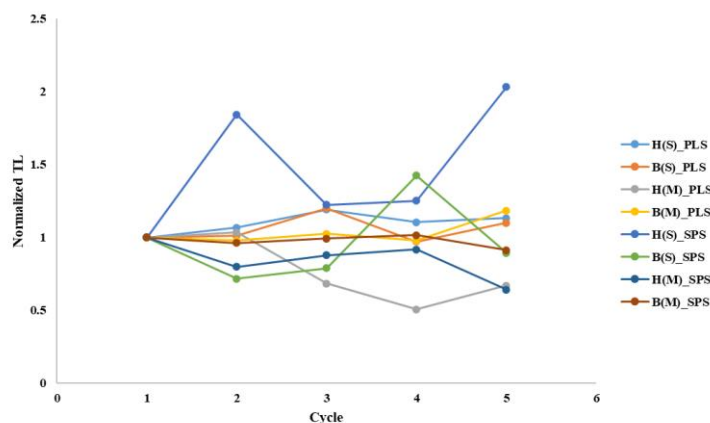
شکل (۵) آزمون محوشدگی قرص‌های تولیدی از پودرهای سنتز شده

شکل (۶) نتایج آزمون محوشدگی قرص‌های تولیدی از پودر تجاری به هردو روش PLS و SPS است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، قرص‌های H(M) برای هردو روش تبدیل به قرص به لحاظ محوشدگی دارای پاسخ مناسبی هستند. و در این بازه زمانی تقریباً یک ماهه حداقل ۶۰ درصد پاسخ اولیه خود را دارند. قرص‌های B(M) در این بازه زمانی یک ماهه بیش از ۶۰ تا ۷۰ درصد پاسخ اولیه خود را از دست می‌دهند، نتیجه‌گیری کلی آزمون محوشدگی در این است که در هردو روش PLS و SPS قرص‌های تولیدی از پودر تجاری به لحاظ محوشدگی دارای پاسخ مناسب‌تری نسبت به قرص‌های حاصل از سنتز هستند. نتیجه دیگری اینکه قرص‌های ساخته شده به روش PLS در آزمون محوشدگی رفتار مناسب‌تری نسبت به قرص‌های تولید شده به روش SPS دارند.



شکل (۶) آزمون محوشدگی قرص‌های تولیدی از پودرهای مرک

آزمون تکرارپذیری نیز برای این نمونه‌ها انجام شده است. این آزمون در دز ۴۰۰ Gy و برای ۵ دوره تکرار شده است. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، قرص‌های H(S) و B(S) به روش SPS به لحاظ تکرارپذیری وضعیت مطلوبی ندارند و پاسخ در دوره‌های متعدد دارای نوسان زیادی است. بیشترین پراکندگی از نظر انحراف معیار نسبی در داده‌ها به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۴۴ و ۰/۲۷ است. به غیر از نمونه H(M) باقی نمونه‌های قرص ساخته شده به روش PLS پراکندگی کمی (بین ۰/۰۷ تا ۰/۰۸) در تکرار پاسخ دزیمتری طی این ۵ دوره دارند. بنابراین در کل می‌توان نتیجه گرفت روش تبدیل به قرص می‌تواند بر میزان تکرارپذیری پاسخ قرص تاثیرگذار باشد.



شکل (۷) آزمون تکرارپذیری قرص‌های تولیدی

۴ - بحث و نتیجه‌گیری:

در این کار پودرهای سرامیکی کلسیم فسفات به دو روش SPS و PLS به قرص تبدیل شده و به لحاظ پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد، پاسخ دزیمتری قرص‌های حاصل از پودر تجاری کلسیم فسفات برای هر دو روش SPS و PLS دارای رفتار تقریباً مشابهی هستند. قرص‌های ساخته شده از پودرهای سنتز شده در پاسخ دزیمتری دارای رفتار متفاوتی می‌باشند. این تفاوت در میزان پاسخ و محدوده خطی بودن است. در کل قرص‌های تولید شده به روش PLS از منظر آزمونهای محوشدگی و تکرارپذیری دارای رفتار مناسبتری می‌باشند. بنابراین با توجه به پاسخ مناسب تر، هزینه کمتر و میزان دسترسی، روش PLS برای تبدیل به قرص نمونه‌های کلسیم فسفات پیشنهاد می‌شود. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که روش تولید قرص و نوع پودر اولیه مورد استفاده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار دزیمتری داشته باشد و انتخاب بهینه این پارامترها می‌تواند به بهبود دقت و کارایی سیستم‌های دزیمتری منجر شود.



۵ - مراجع:

- [۱] M. T. Munir and M. Federighi, "Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations," *Foods*, vol. ۹, no. ۷, p. ۸۷۸, ۲۰۲۰, doi: ۱۰,۳۳۹۰/foods۹۰۷۰۸۷۸.
- [۲] "ع. شادان, "بررسی ابعاد اقتصادی ضایعات محصولات کشاورزی در ایران", *undefined*, ۱۳۸۶, [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/۴۶۷۹۱>
- [۳] G. G. Eichholz, "Dosimetry for Food Irradiation," in *Health Physics*, vol. ۸۴, no. ۵, ۲۰۰۳, p. ۶۶۵. doi: ۱۰,۱۰۹۷/۰۰۰۰۴۰۳۲-۲۰۰۳۰۵۰۰۰-۰۰۰۱۶.
- [۴] A. Miller, "Dosimetry for radiation processing," *Int. J. Radiat. Appl. Instrumentation. Part*, vol. ۲۸, no. ۵-۶, pp. ۵۲۱-۵۲۹, ۱۹۸۶, doi: ۱۰,۱۰۱۶/۱۳۵۹-۰۱۹۷(۸۶)۹۰۱۸۲-۷.
- [۵] M. Adachi, T. Bredow, and K. Jug, "What is the origin of color on metal complex dyes? Theoretical analysis of a Ni-coordinate azo dye," *Dye. Pigment.*, vol. ۶۳, no. ۳, pp. ۲۲۵-۲۳۰, ۲۰۰۴, doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.dyepig.۲۰۰۴,۰۲,۰۱۳.
- [۶] M. Shafaei, F. Ziaie, and N. Hajiloo, "Thermoluminescence properties of micro and nano structure hydroxyapatite after gamma irradiation," *Kerntechnik*, vol. ۸۱, no. ۶, pp. ۶۵۱-۶۵۴, ۲۰۱۶, doi: ۱۰,۳۱۳۹/۱۲۴,۱۱۰۵۷۹.
- [۷] R. Alvarez, T. Rivera, J. Guzman, M. C. Piña-Barba, and J. Azorin, "Thermoluminescent characteristics of synthetic hydroxyapatite (SHAp)," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. ۸۳, pp. ۱۹۲-۱۹۵, ۲۰۱۴, doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.apradiso.۲۰۱۳,۰۴,۰۱۱.
- [۸] B. C. Bhatt and M. S. Kulkarni, "Thermoluminescent phosphors for radiation dosimetry," in *Defect and Diffusion Forum*, Trans Tech Publ, ۲۰۱۴, pp. ۱۷۹-۲۲۷. doi: ۱۰,۴۰۲۸/www.scientific.net/DDF.۳۴۷,۱۷۹.
- [۹] M. Shafaei, F. Ziaie, D. Sardari, and M. M. Larijani, "Study on carbonated hydroxyapatite as a thermoluminescence dosimeter," *Kerntechnik*, vol. ۸۰, no. ۱, pp. ۶۶-۶۹, ۲۰۱۵, doi: ۱۰,۳۱۳۹/۱۲۴,۱۱۰۴۸۴.
- [۱۰] H. Daneshvar, M. Shafaei, F. Manouchehri, S. Kakaei, and F. Ziaie, "The role of La, Eu, Gd, and Dy lanthanides on thermoluminescence characteristics of nano-hydroxyapatite induced by gamma radiation," *SN Appl. Sci.*, vol. ۱, no. ۱۰, p. ۱۱۴۶, ۲۰۱۹, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۴۲۴۵۲-۰۱۹-۱۱۶۲-۴.
- [۱۱] K. Nakashima, M. Takami, M. Ohta, T. Yasue, and J. Yamauchi, "Thermoluminescence mechanism of dysprosium-doped β -tricalcium phosphate phosphor," *J. Lumin.*, vol. ۱۱۱, no. ۱-۲, pp. ۱۱۳-۱۲۰, ۲۰۰۵, doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.jlumin.۲۰۰۴,۰۷,۰۰۲.
- [۱۲] C. Murru, "Research about pressureless sintering of milled powder zr_2 based ceramic with carbon," UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, ۲۰۱۲. [Online]. Available: <https://thesis.unipd.it/handle/۲۰,۵۰۰,۱۲۶۰۸/۱۵۵۷۳>
- [۱۳] U. Anselmi-Tamburini, "Spark Plasma Sintering," M. B. T.-E. of M. T. C. and G. Pomeroy, Ed., Oxford: Elsevier, ۲۰۲۱, pp. ۲۹۴-۳۱۰. doi: <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/B۹۷۸-۰-۱۲-۸۰۳۵۸۱-۸,۱۱۷۳۰-۸>.
- [۱۴] "No Title," *J. Iran. Ceram. Soc.*, vol. ۱۵, no. ۲, ۲۰۱۹, [Online]. Available: <http://jicers.ir/article-۱-۲۷۶-fa.html>



- [۱۵] A. Padnuru Sripathy and M. Gupta, "Insight Into Layered Metal Matrix Composites," D. B. T.-E. of M. C. Brabazon, Ed., Oxford: Elsevier, ۲۰۲۱, pp. ۱۲۱-۱۳۹. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00021-5>.
- [۱۶] M. Performance, N. I. Spectrophotom-, and P. Spectrophotometers, "Standard Practice for Using the Fricke Reference Standard Dosimetry System ۱," ۱۹۹۵. doi: [10.1020/E1026-13](https://doi.org/10.1020/E1026-13).
- [۱۷] P. Taghipour, F. Zolfagharpour, H. Daneshvar, and F. Ziaie, "Thermoluminescence dose-response of synthesized and doped hydroxyapatite: effect of formed crystal phases," *Luminescence*, vol. ۳۷, no. ۵, pp. ۷۴۲-۷۵۷, ۲۰۲۲, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.4217>.



بررسی میزان دز دریافتی ارگان های حساس ناحیه توراکی در تصویربرداری توموگرافی

کامپیوتری با استفاده از کد مونت کارلوی GEANT4 (کد مقاله : ۱۰۹۹)

شریعت ناصری، زهرا^۱ - خوشحال، امیررضا^۲ - آزادبر، علیرضا^{۲*} - شفافی، طراوت^۱

۱. گروه مهندسی پرتویزشکی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۲. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده:

در دنیای امروز، تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری نقشی کلیدی در تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان ایفا می‌کند. با وجود آن که تصویربرداری سی تی اسکن فقط در ۱۱ درصد تصویربرداری ها نقش دارد ولی ۶۷ درصد پرتوگیری ناشی از موارد تشخیصی را شامل می‌شود. با توجه به دز بالای تشعشعات در این روش به دلیل وضوح بالای تصاویر، ارزیابی دز دریافتی توسط ارگان‌های حساس اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از روش های محاسبه دز، استفاده از دزیمتر های ترمولومینسانس و یا TLD (Thermoluminescent dosimeter) می باشد. در این مطالعه شبیه سازی دز دریافتی ناحیه توراکی با استفاده از کد GEANT4 (GEometry AND Tracking) و تصاویر سی تی اسکن فانتوم راندو و قرار دادن دزیمتر های ترمولومینسانس در فانتوم انجام شد و دز دریافتی توسط این ارگان ها از جمله قلب، کبد، سینه و ریه ها محاسبه گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد در تصویربرداری ناحیه توراکی، بیشترین میزان دز دریافتی به ارگان سینه به میزان ۷.۷۹ میلی گری و کمترین میزان دز دریافتی به ارگان کبد به مقدار ۵.۵۱ میلی گری می‌باشد. نتایج این مطالعه شبیه سازی در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات تجربی و شبیه سازی شده بسیار نزدیک می‌باشد.

کلمات کلیدی: توموگرافی کامپیوتری، ناحیه توراکی، دزیمتری، TLD، کد شبیه سازی مونت کارلو GEANT4

Evaluation of the Received Dose to Sensitive Organs in the Thorax during Computed Tomography Imaging Using the GEANT4 Monte Carlo Code

Shariat Naseri, Zahra¹, Khoshhal, Amir Reza², Azadbar, Alireza^{2*}, Shafaei, Taravat¹

۱. Department of Medical Radiation Engineering, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran

۲. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

In the modern world, computed tomography (CT) imaging plays a pivotal role in diagnosing diseases such as cancer. Although CT imaging accounts for only ۱۱% of all diagnostic imaging procedures, it contributes to ۶۷% of the radiation exposure from diagnostic sources. Given the high radiation dose associated with this technique due to the superior image resolution, assessing the dose received by sensitive organs is of paramount importance. One method for dose measurement involves the use of thermoluminescent dosimeters (TLD). In this study, dose simulation for the thoracic region was conducted using the GEANT4 (GEometry AND Tracking) code, CT images of a Rando phantom, and the placement of TLDs within the



phantom. The received dose by organs such as the heart, liver, breast, and lungs were calculated. Simulation results indicated that during thoracic imaging, the highest dose was received by the breast at ۷,۷۹ mGy, while the lowest dose was received by the liver at ۰,۵۱ mGy. The findings of this simulation study are in close agreement with those from other experimental and simulated research, demonstrating consistency and reliability.

Key words: Computed Tomography, Thoracic Region, Dosimetry, TLD, Monte Carlo Simulation Code GEANT^۴

۱- مقدمه:

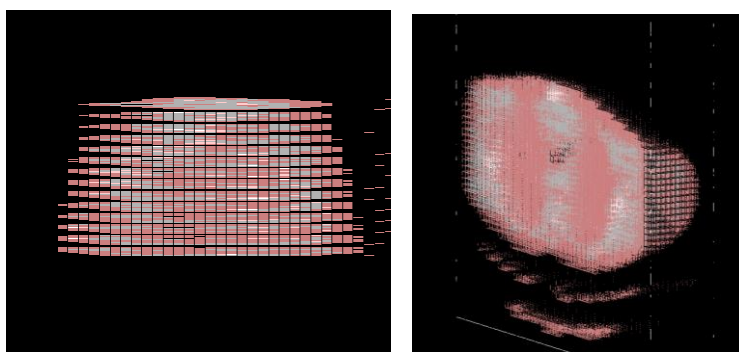
تصویربرداری مقطعی کامپیوتری (CT-Scan) یکی از ابزارهای حیاتی و موثر در تشخیص بیماری‌ها در پزشکی است که در دهه ۱۹۷۰ شناخته شد. با این حال در صورتی که این نوع تصویربرداری بدون ضرورت انجام شود، می‌تواند مشکلات و عوارض جبران‌ناپذیری برای بیمار ایجاد کند [۱، ۲]. سی‌تی اسکن، ترکیبی از تکنولوژی اشعه ایکس و کامپیوتر است و بر اساس تصویربرداری به صورت برش‌های عرضی از بدن انسان، تصاویر ایجاد می‌کند [۳]. به‌طور تقریبی، ۲ درصد از کل سرطان‌ها نتیجه قرارگیری در معرض تابش ناشی از تصویربرداری پزشکی هستند [۱]. براساس گزارش شورای ملی حفاظت از تابش و اندازه‌گیری (NCRP ۱۶۰)، سی‌تی اسکن بیش از نیمی از کل تابش پزشکی دریافتی بیماران را تشکیل می‌دهند [۴]. در این راستا، توصیه می‌شود که سطح تابش به حداقل برسد تا خطرات ناشی از تابش کاهش یابد. این اصل که به (As Low As Reasonably Achievable) ALARA معروف است، تأکید می‌کند که تابش باید فقط به مقدار ضروری باشد و در صورت امکان از روش‌های تشخیصی جایگزین استفاده شود [۵]. واکنش بدن انسان به تابش، بستگی به عوامل مختلفی مانند تعداد معاینات و ویژگی‌های بدن بیمار دارد [۶]. تحقیقات اپیدمیولوژیک اخیر نشان می‌دهد که تابش‌های یونیزه می‌توانند خطر ابتلا به لوسمی، تومورهای مغزی و سرطان‌ها را افزایش دهند. از نگرانی‌های اصلی در تصویربرداری با سی‌تی اسکن، دستیابی به تصویری با کیفیت بالا همراه با استفاده از پروتکل‌های دز پایین است. بهترین روش برای بهینه‌سازی دز، تنظیم پارامترهای سی‌تی اسکن براساس ویژگی‌های فردی بیمار است [۲]. سرطان ریه یکی از مهم‌ترین علت مرگ ناشی از سرطان در سراسر جهان است که تا حدی مرتبط با حضور فراوان مراحل متاستاتیک در زمان تشخیص است که با استفاده از سی‌تی اسکن، تشخیص هر چه زودتر آن امری مهم است [۷]. نوردین و همکاران مطالعاتی در رابطه با بررسی میزان دز و ارزیابی خطر ابتلا به سرطان ناشی از سی‌تی اسکن پرداخته‌اند که با استفاده از نرم‌افزار NCICT نسخه ۳ انجام شد و دز جذب شده نواحی سر، گردن، تنه، شکم و لگن ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین دز دریافتی در نواحی مغز و قفسه سینه می‌باشد [۶]. اکیا و همکارانش مطالعه‌ای در رابطه با اندازه‌گیری دز ارگان‌ها در تصویربرداری سی‌تی اسکن با استفاده از دزیمترهای ترمولومینسانس که از مواد مشابه بافت بدن (Lif:Mg,Ti) ساخته شده‌اند و فانتوم راندو انجام دادند. دزهای موثر اندازه‌گیری شده برای سی‌تی اسکن سر، قفسه سینه و شکم پلیویک به ترتیب ۲,۷۸، ۶,۶۷ و ۱۷ میلی‌سیورت با TLD و ۲,۲۰، ۱۰,۳۰ و ۱۶,۷۰ میلی‌سیورت با CT-Expo بودند [۸]. با استفاده از کد شبیه‌سازی GEANT^۴ می‌توان تخمین‌های سریع‌تری از دز تابش ارائه داد. GEANT^۴ که در سال ۱۹۹۸ در CERN توسعه یافت، ابزاری برای شبیه‌سازی حمل و نقل ذرات در ماده است و از روش مونت کارلو (MC) برای مدل‌سازی تابش‌های یونیزه‌شده، از جمله فوتون‌های یونیزه، استفاده می‌کند [۹]. GEANT^۴ این امکان را فراهم می‌کند که عبور ذرات از مواد مختلف، همراه با مدل‌های فیزیکی، ردیابی، تصویرسازی و مدیریت هندسه، شبیه‌سازی شود. این کد قادر است شرایط آزمایشگاهی واقعی را با دامنه انرژی از ۱ الکترون‌ولت تا ترا الکترون‌ولت شبیه‌سازی کند. GEANT^۴ که با استفاده از برنامه‌نویسی شی‌گرا در زبان C++ توسعه یافته است، در حوزه‌های فیزیک پزشکی، هسته‌ای، ذرات، طراحی شتاب‌دهنده‌ها و مهندسی فضایی کاربرد دارد [۱۰-۱۲]. در این مطالعه با استفاده از کد شبیه‌سازی GEANT^۴ فرآیند سی‌تی اسکن و تابش آن شبیه‌سازی شد. برای ارزیابی عملکرد سیستم و تحلیل تابش، از تصاویر دایکام فانتوم راندو استفاده گردید که



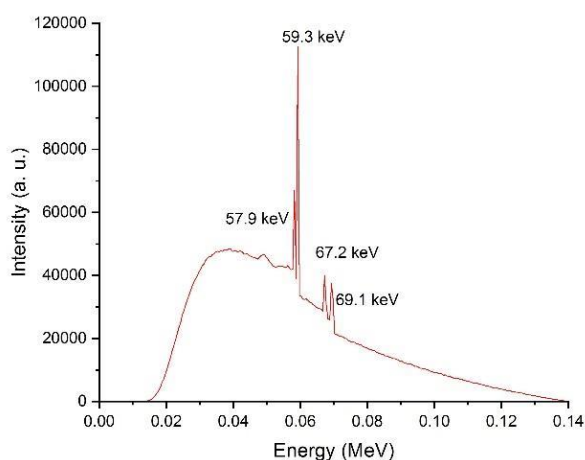
در ۴GEANT بازخوانی شدند و دزیمترهای ترمولومینسانس درون آن قرار داده شدند. نتایج نشان داد میزان دز رسیده قلب ۶۰۸ میلی‌گری، سینه ۷۰۷ میلی‌گری، ریه ۶۸۸ میلی‌گری و کبد ۵۵۱ میلی‌گری می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای مناسبی جهت اصلاح پروتکل‌های تصویربرداری با سی تی اسکن باشد.

۲- روش کار:

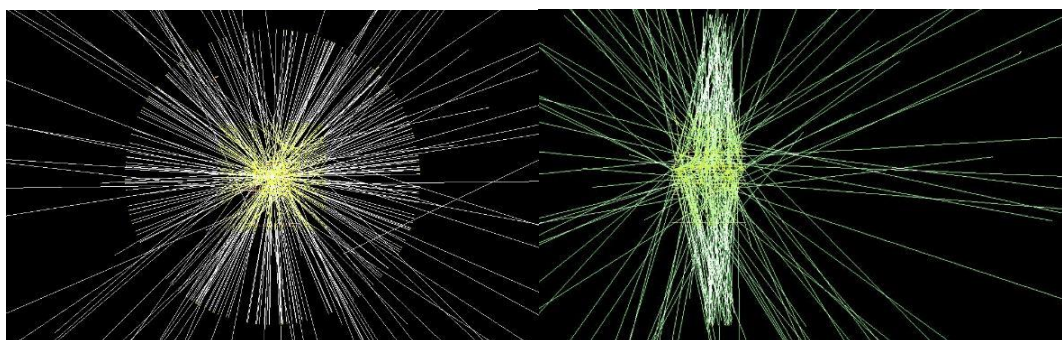
در این مطالعه که هدف محاسبه دز رسیده به ارگان‌های ناحیه توراکس در تصویربرداری سی تی اسکن ریه‌ها می‌باشد، از کد مونت کارلوی ۴GEANT و یک سیستم ۶۰ هسته‌ای به همراه ۱۶۰ گیگ رم جهت شبیه‌سازی استفاده شد. در ابتدا یک فانتوم وکسل‌بندی شده با استفاده از تصاویر سی تی اسکن فانتوم راندو در فرمت DICOM تعریف شد. سپس، تصاویر DICOM به کد وارد شده و مطابق با شکل ۱، سیزده برش از فانتوم در ناحیه توراکس ایجاد شد. بر اساس گزارش شماره ۴۶ کمیسیون بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری‌های پرتویی (ICRU) [۱۳]، چگالی ارگان‌های مختلف در ناحیه توراکس، تعریف گردید. برای تعریف منبع تابش سی تی اسکن، یک لوله اشعه ایکس ساده با محفظه استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ و فضای داخلی خلأ شبیه‌سازی شد. این لوله شامل آند تنگستنی، پنجره بریلیومی و فیلتر آلومینیومی بود. الکترون‌های مونوانرژیک با انرژی ۱۲۰ کیلوالکترون‌ولت به سمت آند شتاب داده شدند و طیف اشعه ایکس ترمزی تولید و ذخیره شد (شکل ۲). همانطور که در شکل ۳ مشخص است، این منبع به صورت پرتو بادبزی برای پوشش کل فانتوم و تابش از زوایای ۰ تا ۳۶۰ درجه طراحی گردید. پس از تعریف منبع تابشی، ۶۴ دزیمتر TLD در ارگان‌های ریه (۳۰ قرص TLD)، کبد (۱۰ قرص TLD)، قلب (۱۰ قرص TLD) و سینه (۱۴ قرص TLD) قرار داده شدند. در این مطالعه، برای دزیمتری در حجم‌های TLD داخل یک فانتوم وکسلایز، از قابلیت اسکورینگ ۴GEANT استفاده شد. این روش با قرار دادن آشکارسازهای مجازی در مکان‌های مشخص شده توسط کاربر، دز را در حجم‌های مکعبی و استوانه‌ای محاسبه می‌کند. مشخصات و ابعاد هر وکسل با ابزار ImageJ استخراج و اسکورینگ استوانه‌ای برابر با ابعاد واقعی TLD تعریف شد. دزیمترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی از نوع ^{200}GR با جنس LiF:Mg,Cu,P هستند. همچنین، این دزیمترها به صورت استوانه‌ای با شعاع ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند. شبیه‌سازی با ۲۰۰ میلیون فوتون اولیه انجام شد که خطای آماری را به کمتر از ۵ درصد رساند.



شکل (۱) تصویر ناحیه توراکس شبیه‌سازی شده در 4GEANT



شکل (۲) طیف اشعه ایکس ترمزی و قله‌های ایکس مشخصه شبیه‌سازی شده با ولتاژ ۱۲۰ کیلوولت



شکل (۳) نمای پرتودهی فانتوم توسط یک باریکه بادبزنی ایکس ترمزی

برای تعریف فیزیک مسئله، از کتابخانه G4EmLivermorePhysics در GEANT4 استفاده شده است. این کتابخانه یکی از کامل‌ترین کلاس‌های فیزیک الکترومغناطیسی استاندارد به شمار می‌آید و توانایی ارائه داده‌های مقطع مقطعی برای انواع مختلف ذرات از جمله فوتون‌ها، الکترون‌ها و پروتون‌ها را در یک محدوده وسیع انرژی از ۲۵۰ الکترون‌ولت تا چند صد مگاالکترون‌ولت دارد. این کلاس مبتنی بر داده‌های فیزیکی شناخته‌شده لیورمور است که برای تحلیل دقیق‌تر تعاملات الکترومغناطیسی طراحی شده‌اند [۱۴]. برهم‌کنش‌های تعریف شده برای فوتون‌ها در این کتابخانه شامل اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تولید جفت و پراکندگی هم‌دوس است. علاوه بر این، برای مدل‌سازی فرآیندهای واپاشی و انتقال‌های الکترونی پس از تحریک، از کلاس G4Decay استفاده شده است. این کلاس امکان شبیه‌سازی دقیق گسیل تابش‌های پرتو



ایکس مشخصه و الکترون‌های اوژه را فراهم می‌آورد و به دقت شبیه‌سازی‌های فیزیکی کمک می‌کند. در این ابزار، فرآیندهای فیزیکی مرتبط با تعاملات تابش‌های الکترومغناطیسی و ذرات هسته‌ای با مواد مختلف شبیه‌سازی می‌شود.

۳- نتایج و بحث:

از آنجایی که ۶۴ قرص TLD در ارگان‌های مورد نظر قرار داده شده بودند، نتایج بدست آمده از آنها به طور میانگین محاسبه شدند و مقادیر نهایی دز رسیده به ارگان‌های کبد، ریه، قلب و سینه در شبیه‌سازی تصویربرداری سی‌تی اسکن ریه‌ها در ناحیه توراکس به واحد میلی‌گری (mGy)، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مقادیر نهایی دز

ارگان	قلب	سینه	ریه	کبد
دز (میلی‌گری)	6.085 ± 0.17	7.791 ± 0.53	6.882 ± 0.49	5.511 ± 0.26

با توجه به جدول ۱ بیشترین مقدار دز به ارگان سینه به میزان ۷.۷۹۱ میلی‌گری و کمترین مقدار آن به کبد به میزان ۵.۵۱۱ میلی‌گری رسیده است. با توجه به نحوه قرارگیری فانتوم در برابر تابش، فاصله سینه تا منبع کم بوده و دز بیشتری دریافت کرده است. همچنین ارگان کبد در نواحی عمیق تری قرار گرفته است و طبیعتاً دز کمتری نسبت به سایر ارگان‌ها دریافت کرده است. در جدول ۲ نتایج چندین مطالعه مشابه اندازه‌گیری میزان دز رسیده به این ارگان‌ها به صورت تجربی و شبیه‌سازی آورده شده است.

جدول ۲. نتایج سایر مطالعات

دز رسیده به ارگان‌ها (میلی‌گری)					ارگان‌ها
Paul, J., et al [۱۹]	Abo Shdeed, T., et al.[۱۸]	Atefeh, T., et al.[۱۷]	Musa, et al[۱۶]	Akyea-Larbi, K.O., et al [۱۵]	
نتایج تجربی	نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو	نتایج تجربی	نتایج تجربی	نتایج تجربی	



قلب	۷.۲۹	-	۶.۸۳ (دیواره قلب)	۴.۶۲	-
سینه	۵.۶۱	-	۶.۵۷	۶.۲۲	-
ریه	۵.۶۵	۹.۴۰	۶.۴۷	-	۱۲.۷۵
کبد	-	-	۶.۲۲	۱.۷۵	۸.۸۶

مقایسه اعداد جدول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که خطای شبیه سازی بسیار پایین بوده و نتایج شبیه سازی مقدار نزدیکی با نتایج تجربی و شبیه سازی سایر مطالعات دارند. با توجه به جدول ۱ و ۲ نتایج نشان دهنده این است که در تصویر برداری سی تی اسکن ناحیه توراکس با پروتکل خاص (۱۵۰ میلی آمپر و ۱۲۰ کیلوولتاژ) با توجه به زمان پرتودهی می‌تواند متغیر باشد، به طوریکه هرچه زمان پرتودهی افزایش یابد، دز رسیده به بافت های بدن بیشتر می‌شود و خطر ابتلا به انواع بیماری ها از جمله سرطان را افزایش می‌دهد. با توجه به بالا بودن دز تابش در این روش تصویربرداری، رعایت پروتکل ها و پرهیز از سی تی اسکن های غیرضروری موضوع قابل توجهی است که باید در مراکز تصویربرداری مورد توجه قرار گیرد. اگرچه سی تی اسکن ابزار بسیار قدرتمندی در تشخیص بسیاری از بیماری ها است، اما استفاده نامناسب و غیرضروری از آن، دزهای پرتوهای اضافی را به بیماران تحمیل می کند و ممکن است اثرات جبران ناپذیری بر جای بگذارد [۲۰]. با کاهش دز رسیده به ارگان ها ، تا زمانی که اثر مخربی بر کیفیت تصویر نداشته باشد، می توان از دزهای اضافی به بیماران جلوگیری کرد. در این مطالعه نشان داده شد میزان دز رسیده به ارگان های قلب، ریه، سینه و کبد در تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری در حد مجاز ICRP نیز می باشد [۲۱].

۴- نتیجه گیری:

سی تی اسکن یک روش پیشرفته تصویربرداری پزشکی است که برای ارزیابی و بررسی دقیق ساختارهای داخلی بدن از اشعه ایکس استفاده می‌کند. در این مطالعه، تصویربرداری سی تی اسکن ریه ها در ناحیه توراکس شبیه سازی شد و دز دریافتی ارگان های حساس ناحیه توراکس از جمله قلب، ریه، سینه و کبد محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشترین دز دریافتی مربوط به ارگان سینه (۷.۷۹ میلی گری) و کمترین دز مربوط به کبد (۵.۵۱ میلی گری) بوده است. همچنین دز دریافتی ارگان قلب برابر ۶.۰۸ میلی گری و ارگان ریه برابر با ۶.۸۸ میلی گری محاسبه شده است. این یافته ها با نتایج سایر مطالعات تجربی و شبیه سازی شده در ارتباط نزدیک قرار دارد و دقت بالای شبیه سازی را تأیید می‌کند. با توجه به اهمیت اندازه گیری دز تابشی در تصویربرداری پزشکی، این تحقیق بر لزوم رعایت پروتکل های استاندارد و کاهش دز تابش به ارگان های حساس بدون کاهش کیفیت تصویر تأکید دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای مناسبی برای بهینه سازی پروتکل های تصویربرداری سی تی اسکن و همچنین راهگشای پژوهش های آینده در زمینه ارزیابی دز تابش و پیشگیری از اثرات منفی آن بر سلامت بیماران باشد. همچنین، استفاده از تکنیک های شبیه سازی برای کاهش خطاها و بهبود دقت اندازه گیری ها در این گونه مطالعات امری ضروری به نظر می‌رسد. شایان ذکر است که تفاوت در مقادیر دز گزارش شده در سایر مطالعات به دلیل تفاوت در پروتکل های تصویربرداری است. این تفاوت ها می‌توانند ناشی از تغییرات در پارامترهایی نظیر انرژی تابش، زمان تابش و نوع فانتوم استفاده شده باشند، که بر دز دریافتی تأثیرگذار است. این امر ضرورت اصلاح و بهینه سازی پروتکل ها را برای کاهش دز تابش به بیماران تأکید می‌کند.



۵- مراجع:

- [۱] S. Gharbi, S. Labidi, M. Mars, M. Chelli, S. Meftah, and M. Ladeb, "Assessment of organ dose and image quality in head and chest CT examinations: a phantom study," *Journal of Radiological Protection*, vol. ۳۸, no. ۲, p. ۸۰۷, ۲۰۱۸.
- [۲] A. Sulieman *et al.*, "Patient radiation dose reduction using a commercial iterative reconstruction technique package," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۱۷۸, p. ۱۰۸۹۹۶, ۲۰۲۱.
- [۳] H. Kasban, M. El-Bendary, and D. Salama, "A comparative study of medical imaging techniques," *International Journal of Information Science and Intelligent System*, vol. ۴, no. ۲, pp. ۳۷-۵۸, ۲۰۱۵.
- [۴] T. A. Shdeed, M. Nahili, N. A. Issa, and A. Bitar, "Study of absorbed dose in important organs during helical CT chest scan using MCNP code and MIRD phantom," *The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, vol. ۴۷, no. ۴, pp. ۱۶۴۹-۱۶۶۳, ۲۰۱۶.
- [۵] L. Sadri, H. Khosravi, and S. Setayeshi, "Assessment and evaluation of patient doses in adult common CT examinations towards establishing national diagnostic reference levels," *International Journal of Radiation Research*, vol. ۱۱, no. ۴, pp. ۲۴۵-۲۵۲, ۲۰۱۳.
- [۶] N. A. Chowdhury, L. Wang, L. Gu, and M. Kaya, "Exploring the Potential of Sensing for Breast Cancer Detection," *Applied Sciences*, vol. ۱۳, no. ۱۷, p. ۹۹۸۲, ۲۰۲۳.
- [۷] P. Wang, P. Martel, M. El Hajjam, L. Grimaldi, and E. G. Leprieur, "Incidental diagnosis of lung cancer on chest CT scan performed for suspected or documented COVID-۱۹ infection," *Respiratory Medicine and Research*, vol. ۸۵, p. ۱۰۱۰۸۴, ۲۰۲۴.
- [۸] K. Akyea-Larbi, F. Hasford, S. Inkoom, M. Tetteh, and P. Gyekye, "Evaluation of organ and effective doses using anthropomorphic phantom: A comparison between experimental measurement and a commercial dose calculator," *Radiography*, vol. ۳۰, no. ۱, pp. ۱-۵, ۲۰۲۴.
- [۹] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۱۰] A. B. Khatibani, A. R. Khoshhal, E. B. Tochaee, S. R. Jamnani, and H. M. Moghaddam, "Physical and gamma radiation shielding features of $\text{Sm}^{203}/\text{graphene}$ nanoparticles: A comparison between experimental and simulated gamma shielding capability," *Inorganic Chemistry Communications*, p. ۱۱۲۷۷۲, ۲۰۲۴.
- [۱۱] A. R. Khoshhal, A. Esmaili Torshabi, and S. Babamohammadi, "Investigation of the Produced Positrons and Their Dose Deposition at Bone and Soft Tissue Organs at Proton Therapy: A Simulation Study," *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, vol. ۳۲, no. ۱۵۵, pp. ۴۰۵-۴۱۴, ۲۰۲۴.
- [۱۲] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of $\text{ZnCo}^{204}\text{O}_4$ and $\text{ZnCo}^{204}\text{O}_4/\text{graphene}$ nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.
- [۱۳] D. White, R. Griffith, and I. Wilson, "ICRU reports," *Reports of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, no. ۱, pp. ۲۰۳-۲۰۵, ۱۹۹۲.
- [۱۴] D. E. Cullen, J. H. Hubbell, and L. Kissel, "EPDL۹۷: the evaluated photo data library^{۹۷} version," Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), ۱۹۹۷.



- [۱۵] K. O. Akyea-Larbi, F. Hasford, S. Inkoom, M. A. Tetteh, and P. K. Gyekye, "Evaluation of organ and effective doses using anthropomorphic phantom: A comparison between experimental measurement and a commercial dose calculator," *Radiography*, vol. ۳۰, no. ۱, pp. ۱-۵, ۲۰۲۴/۰۱/۰۱/۲۰۲۴.
- [۱۶] N. Musa, N. Alatta, and M. M, "Measurement of Radiation Doses in Computed Tomography and Estimated Radiological Risk factor of Cancer -Libya," ۰۱/۰۱ ۲۰۲۴.
- [۱۷] T. Atefeh, K. Hosein, K. Maryam, and P. Reza, "Dose Assessment and Evaluation of Cancer Risk due to Prevalent CT Scan Procedures," *Frontiers in Biomedical Technologies*, vol. ۰, no. ۰, ۰۴/۲۴ ۲۰۲۴.
- [۱۸] T. Abo Shdeed, M. Nahili, N. Abo Issa, and A. Bitar, "Study of absorbed dose in important organs during helical CT chest scan using MCNP code and MIRD phantom," *The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, vol. ۴۷, no. ۴, pp. ۱۶۴۹-۱۶۶۳, ۲۰۱۶/۱۲/۰۱/۲۰۱۶.
- [۱۹] J. Paul, R. Banckwitz, B. Krauss, T. J. Vogl, W. Maentele, and R. W. Bauer, "Estimation and comparison of effective dose (E) in standard chest CT by organ dose measurements and dose-length-product methods and assessment of the influence of CT tube potential (energy dependency) on effective dose in a dual-source CT," *European Journal of Radiology*, vol. ۸۱, no. ۴, pp. e۵۰۷-e۵۱۲, ۲۰۱۲/۰۴/۰۱/۲۰۱۲.
- [۲۰] S. Halliburton *et al.*, "State-of-the-art in CT hardware and scan modes for cardiovascular CT," *Journal of cardiovascular computed tomography*, vol. ۶, no. ۳, pp. ۱۵۴-۱۶۳, ۲۰۱۲.
- [۲۱] C. Cousins *et al.*, "International commission on radiological protection," *ICRP publication*, vol. ۱۲۰, pp. ۱-۱۲۵, ۲۰۱۱.



ساخت ذرات $Zn_3(PO_4)_2:La$ و مطالعه خصوصیات دزیمتری ترمولومینسانس آن در پرتودهی

گاما (کد مقاله : ۱۱۱۳)

زهره گلشهری^{۱*} - احسان صادقی^۲ - مصطفی زاهدی^۱

۳. دانشگاه کاشان ، دانشکده فیزیک ، گروه فیزیک هسته ای

۴. دانشگاه کاشان ، پژوهشکده علوم و فناوری نانو

چکیده:

در این مطالعه، ذرات فسفات روی با ناخالصی لانتانیوم از طریق روش هم‌رسوبی ساخته شدند. ساختار کریستالی این ذرات با استفاده از آنالیز XRD مشخص گردید و نتایج به‌دست‌آمده حاکی از تشکیل صحیح ساختار کریستالی مد نظر بود. منحنی ترمولومینسانس دزیمتر فسفات روی با ناخالصی لانتانیوم پس از قرارگیری در معرض تابش گاما با دزهای مختلف از ۵۰ تا ۱۰۰۰ گری و با استفاده از چشمه ^{60}Co ثبت شد. لازم به ذکر است قدرت این چشمه ۲۹۶۳ کوری و انرژی منتقل شده ۰.۶۹ مگرای در هر ثانیه بوده است. ویژگی‌های دزیمتری ترمولومینسانس این فسفر مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که این ذرات تحت تابش گاما دارای پاسخ خطی تا مقادیر بیش از ۱۰۰۰ گری هستند. از منحنی ترمولومینسانس برازش شده برای نمونه‌ای که با فسفات حاوی ناخالصی لانتانیوم ساخته شده است، مقدار FOM محاسبه‌شده برابر با ۰/۵۹ است که نشان‌دهنده تطابق خوب میان داده‌های تجربی و منحنی نظری است.

کلمات کلیدی: دزیمتری، ترمولومینسانس، روی فسفات، ناخالصی لانتانیوم، تابش گاما، پاسخ دز

Synthesis of $Zn_3(PO_4)_2:La$ Particles and Investigation of Their Thermoluminescent Dosimetric Properties in Gamma Irradiation

Zahra Golshahri^{۱,۲}, Ehsan Sadeghi^{۱,۲}, Mostafa Zahedifar^{۱,۲}

۱. University of Kashan, Faculty of Physics, Nuclear Physics Department

۲. University of Kashan, Institute of Nanoscience and Nanotechnology

Abstract:

In this study, zinc phosphate particles doped with lanthanum impurity were synthesized through the co-precipitation method. The crystalline structure of these particles was identified using XRD analysis, and the results indicated the successful formation of the desired crystalline structure. The thermoluminescence curve of the zinc phosphate dosimeter with lanthanum impurity was recorded after gamma irradiation with different doses from ۵۰ to ۱۰۰۰ Gy using a ^{60}Co source. It is worth mentioning that the power of this source was ۲۹۶۳ curies, and the energy transferred was ۰.۶۹ Gy per second. The dosimetric thermoluminescence properties of this phosphor were analyzed. The findings revealed that these nanoparticles exhibited a linear response to gamma radiation up to values exceeding ۱۰۰۰ Gy. From the fitted thermoluminescence curve for the sample made with phosphate containing lanthanum impurity, the calculated FOM value is ۰.۵۹, indicating a good agreement between the experimental data and the theoretical curve.

Key words: Dosimetry, TL, Zinc phosphate, Lanthanum impurity, Gamma radiation



۱- مقدمه:

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه آشکارسازی تابش‌های یون‌ساز و کاربردهای آن در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی حاصل شده است. پرتوهای یون‌ساز، شامل پرتوهای آلفا، بتا و گاما، به دلیل توانایی‌شان در ایجاد تغییرات در ساختار مواد، در حوزه‌های پزشکی، ایمنی هسته‌ای، دزیمتری و مطالعات زیست‌محیطی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. این تابش‌ها ممکن است آسیب‌هایی به بافت‌های زنده وارد کرده و یا به محیط زیست صدمات جبران‌ناپذیری بزنند. بنابراین، نیاز به دزیمترهای دقیق و حساس برای اندازه‌گیری این پرتوها، به‌ویژه در مناطق پرخطر و در شرایط مختلف، امری ضروری است. در کاربردهای مختلف، مانند درمان‌های تابشی سرطان، حفاظت در صنایع هسته‌ای و اندازه‌گیری‌های تابشی در فضا، اندازه‌گیری دقیق تابش در مقادیر بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دزیمتری در دزهای بالا نیاز به دزیمترهایی با دقت و حساسیت بالا و همچنین توانایی تحمل شرایط تابش شدید دارد. به‌خصوص در محیط‌های پرخطر، استفاده از دزیمترهای قابل اعتماد می‌تواند به پیشگیری از آسیب‌های احتمالی کمک کرده و اطلاعات حیاتی را برای ایمنی فراهم آورد.

در این راستا، دزیمترهای ترمولومینسانس (TL) به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در آشکارسازی تابش‌های یون‌ساز شناخته می‌شوند. این مواد قادرند انرژی ذخیره‌شده ناشی از تابش‌های یون‌ساز را در زمان‌های بعد از تابش به‌صورت نور منتشر کنند. فسفات‌ها به‌عنوان یکی از بهترین مواد برای ترمولومینسانس، در این زمینه استفاده می‌شوند و افزودن ناخالصی‌هایی خاص مانند لانتانیوم می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص ترمولومینسانس آنها را بهبود بخشد. از جمله مهمترین کاربردهای پدیده ترمولومینسانس استفاده در کاربردهای دزیمتری (Dosimetry) و عمرسنجی (Dating) می‌باشد [۱-۵]. کاهش اندازه ذرات به‌طور قابل توجهی خواص الکترونیکی و نوری ذرات را به دلیل محصور شدن کوانتومی سه بعدی الکترون‌ها و حفره‌ها هنگامی که اندازه ذره به شعاع بور اکسایتون نزدیک می‌شود، تغییر می‌دهد [۶]. تلاش‌های زیادی برای کنترل ساختارهای الکترونیکی نانوذرات با تغییر اندازه، شکل و ترکیب آن‌ها صورت گرفته است. فسفات‌های دوپ‌شده با یون‌های خاکی کمیاب دارای ویژگی‌های درخشان منحصربه‌فردی هستند که ناشی از پایداری و بازده کوانتومی انتشار بالا است. $b\text{-Zn}_2(\text{PO}_4)_2: \text{Mn}^{2+}$ برای اولین بار توسط گروه Su به‌عنوان یک منبع نورتاب قرمز گزارش شد [۷]. در مطالعات دیگر فسفر $\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_2$ با دوپنت‌های مختلف ساخته شده و خواص نوری آنها به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است [۸-۱۱]. در تحقیق حاضر روی فسفات با ناخالصی لانتانیوم ساخته شد و خصوصیات ساختارشناسی آن مطالعه شد و همچنین منحنی درخشش ترمولومینسانس آن تحت تابش گاما مورد بررسی قرار گرفت.

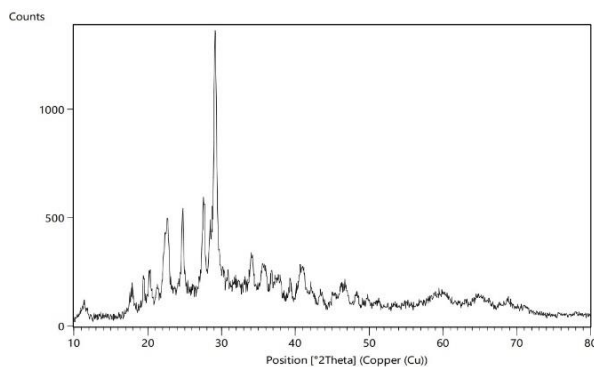
۲- روش کار:

در این مطالعه، نانوذرات روی فسفات با ناخالصی لانتانیوم به طریق هم‌رسوبی ساخت و تولید شدند. برای تولید نانوذرات $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{La}$ ، مواد اولیه فسفات روی، دی‌آمونیم فسفات و بریج ۳۵ تهیه شده از شرکت مرک استفاده شدند. در شروع فرایند ساخت فسفات روی در آب دیونیزه حل شده و سپس دی‌آمونیم فسفات در بشر جداگانه در آب دیونیزه حل شد. محلول فسفات روی به‌عنوان پایه استفاده شده و سپس محلول سورفکتانت به آن اضافه شد. در این مرحله، ناخالصی نیترات لانتانیوم برای ساخت نمونه $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{La}$ به محلول قبل اضافه گردید. سپس محلول دی‌آمونیم فسفات به محلول حاوی فسفات روی و سورفکتانت در حین هم خوردن روی همزن مغناطیسی، اضافه شد. در نهایت، محلول سدیم هیدروکسید به مقدار کم و در دفعات به محلول اضافه و به هم خوردن محلول به مدت ده دقیقه انجام شد. در نهایت نمونه‌ها در آون به مدت پنج ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد خشک و در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت کلسینه شدند. برای ارزیابی خواص دزیمتری ترمولومینسانس نمونه، فرآیند گرمادهی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد در یک کوره با دقت ± 1 درجه سانتیگراد انجام شد و سپس نمونه‌ها به سرعت تا دمای اتاق سرد شدند. پرتو دهی نمونه‌ها با استفاده از چشمه ^{60}Co انجام گرفت و اندازه‌گیری دز ترمولومینسانس با استفاده از دستگاه قرائتگر TLD Harshaw مدل ۴۵۰۰ صورت پذیرفت.

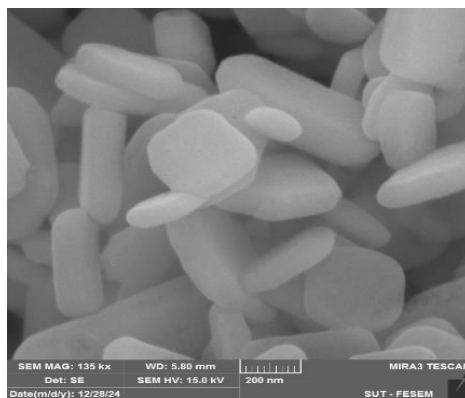


۳- نتایج:

برای ارزیابی صحت تشکیل ساختار بلوری نمونه فسفات روی، از روش پراش پرتو ایکس (XRD) بهره گرفته شد. ساختار نمونه تولیدی با استفاده از دستگاه Philips X'pert Pro MPP و با طیف نگاری Cu که فیلتر نیکل دارد، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱، الگوی XRD ذرات فسفات روی سنتز شده به روش هم رسوبی نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوی XRD به دست آمده با الگوی مرجع ۰۰-۰۲۹-۱۳۹۰ مطابقت دارد که تایید کننده تشکیل بلورهای $Zn_3(PO_4)_2$ با ساختار Monoclinic است. علاوه بر این، هیچ قله اضافی در نمودار به دست آمده نسبت به طیف مرجع مشاهده نمی‌شود که این امر می‌تواند دلیلی بر صحت ساخت و عدم وجود آلودگی‌های ناخواسته در نمونه نهایی باشد. همچنین برای درک چگونی مورفولوژی ذرات ساخته شده از آنالیز SEM استفاده شد. نتیجه مربوط به انجام این آنالیز در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود، ساختار مکعبی شکل ذرات با طول یک ضلع کمتر از ۱۰۰ نانومتر به طور همگنی برای ناحی مختلف تشکیل شده است. سایر اضلاع این مکعب‌ها بالای ۲۰۰ نانومتر می‌باشند.



شکل ۱: الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های ساخته شده روی فسفات با ناخالصی لانتانیم.

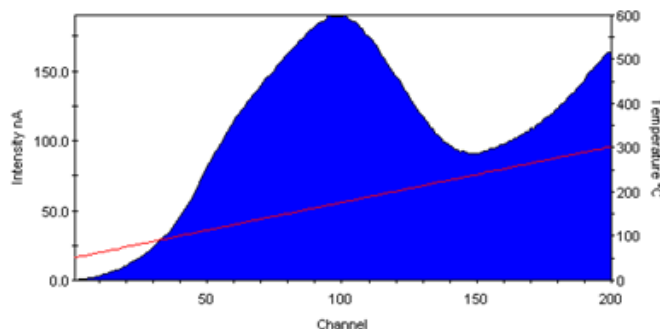


شکل ۲: تصویر SEM مربوط به ذرات روی سولفات ساخته شده به روش هم رسوبی.

منحنی ترمولومینسانس یکی از داده‌های اصلی در بررسی و مطالعه دزیمترها است که به کمک آن می‌توان اطلاعات مهمی راجع به عملکرد دزیمتر به دست آورد. برای ثبت این منحنی، ابتدا باید از یک رژیم حرارتی استفاده شود تا تله‌های دزیمتری که به دلایل مختلف قبل از پرتودهی پر شده‌اند، پاک شوند. دما و زمان نگهداری در این دما از پارامترهای کلیدی در این رژیم هستند. برای شناسایی بهترین دما و زمان نگهداری برای دزیمتر ساخته شده از فسفات با ناخالصی La، دماهای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه آزمایش شدند. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه دما و زمان، ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه است. مرحله بعدی برای ثبت منحنی ترمولومینسانس، پرتودهی دزیمتر بود که برای این



منظور از منبع ^{60}Co گاماسل در سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شد. سپس نمونه پرتودهی شده در دستگاه قرائت گر قرار گرفت و منحنی درخشش ترمولومینسانس آن در بازه دمایی ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد و با آهنگ دمایی ۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه ثبت شد. شکل ۳ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد. پارامترهای سینتیکی از جمله داده‌های بسیار مهمی هستند که از منحنی درخشش ترمولومینسانس هر دزیمتر قابل استخراج می‌باشند و می‌توانند برخی ویژگی‌های مربوط به گیراندازهای موجود در ساختار بلوری دزیمتر را مشخص کنند. در مرحله بعد، تلاش بر این بود تا پارامترهای سینتیکی مربوط به منحنی درخشش نمونه ساخته شده تعیین گردد.



شکل ۳: منحنی درخشش ترمولومینسانس ذرات روی سولفات ساخته شده به روش هم رسوبی.

در واقع، میزان انطباق بین قله‌های تجربی و نظری را می‌توان با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که بر اساس الگوریتم Marquart-Levenberg طراحی شده، به دست آورد. این برنامه به روش تکرار عمل می‌کند و از پارامترهای هندسی قله‌های ترمولومینسانس تجربی مانند شدت بیشینه (I_m) و دمای بیشینه (T_m) استفاده کرده و با انطباق آن‌ها با نتایج نظری، منحنی تجربی را برازش می‌دهد. در این تحقیق، از مدل سینتیکی مرتبه‌عام برای تعیین پارامترهای سینتیکی استفاده شد که معادله آن به صورت تابعی از شدت بیشینه و دمای بیشینه به شرح زیر می‌باشد [۱۲]:

$$I(T) = I_m b^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) \times \left\{ \frac{T^2}{T_m^2} (b-1) \left(1 - \frac{2kT}{E}\right) \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) + 1 + (b-1) \frac{2kT_m}{E} \right\}^{-\frac{b}{b-1}} \quad (1)$$

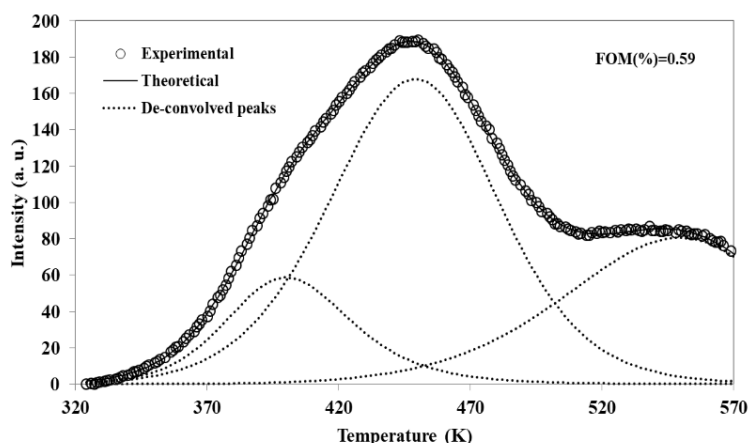
که در آن b پارامتر سینتیک بین ۱ و ۲ است، E انرژی فعالسازی، T دما بر حسب کلوین، T_m دمای بیشینه و k ثابت بولتزمن می‌باشد. برای تعیین میزان انطباق منحنی ترمولومینسانس تئوری و تجربی از رابطه FOM به صورت زیر استفاده شد [۱۳]:

$$FOM = \frac{\sum |y_i - f_i|}{\sum y_i} \times 100 \quad (2)$$

در این معادله y_i به مقادیر واقعی یا داده‌های تجربی اشاره دارد و f_i بهترین مقداری است که از طریق فرآیند تطبیق به دست می‌آید [۲۰]. برای اطمینان از تطابق دقیق نتایج نظری و تجربی، مقادیر FOM کمتر از ۲.۵ درصد به عنوان مقدار مناسب در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ منحنی ترمولومینسانس برازش شده برای نمونه‌ای که با فسفات حاوی ناخالصی لانتانیم ساخته شده است را نمایش می‌دهد. مقدار FOM محاسبه شده برابر با ۰/۵۹ است که نشان‌دهنده تطابق خوب میان داده‌های تجربی و



منحنی نظری است. نتایج نشان می‌دهند که منحنی درخشش دزیمتر تولید شده از سه قله در دماهای ۴۰۰، ۴۴۸ و ۵۴۸ کلوین تشکیل شده است. شکل ۴ نتیجه برازش و همچنین جدول ۱ نتایج مربوط به برازش انجام شده را نشان می‌دهند.



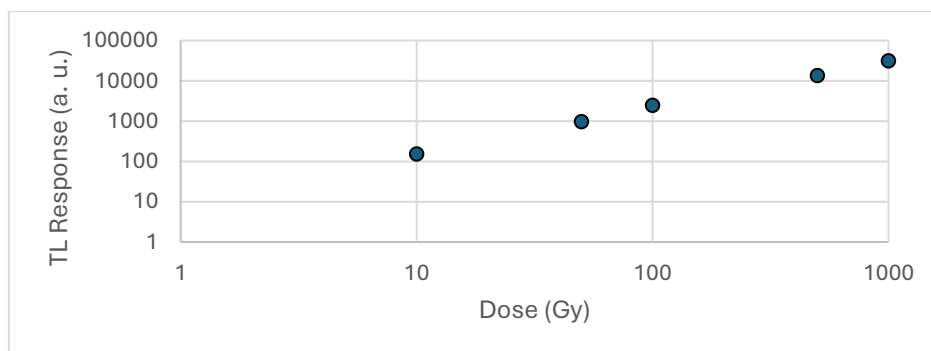
شکل ۴: منحنی درخشش ترمولومینسانس برازش شده با مدل مرتبه عامذرات روی سولفات.

جدول (۱): نتایج مربوط به پارامترهای سینتیک منحنی درخشش دزیمتر روی فسفات با ناخالصی لانتانیم.

peak	B	E (eV)	T_m (K)	I_m (a.u)
۱	۲/۰۰	۰/۸۱	۴۰۰/۰	۵۸/۷
۲	۱/۵۱	۰/۶۴	۴۴۸/۳	۱۶۷/۸
۳	۱/۲۵	۰/۶۸	۵۴۸/۳	۸۰/۵

۳-۱- پاسخ دز

در دزیمترهای ترمولومینسانس، به عنوان یکی از ویژگی‌های حیاتی یک دزیمتر ایده‌آل، باید در یک ناحیه خطی باشد. این به این معناست که در این ناحیه، میزان دز جذب شده به‌طور مستقیم و خطی با سیگنال ترمولومینسانس دزیمتر ارتباط دارد.





در این مطالعه، پاسخ دز ترمولومینسانس دزیمتر ساخته شده در دزهای مختلف گاما تا ۱۰۰۰ گری مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که از شکل بالا مشاهده می‌شود، پاسخ ترمولومینسانس در این بازه دز به صورت خطی تغییر می‌کند. وجود یک ناحیه خطی برای پاسخ دز تا مقادیر بیش از ۱۰۰۰ گری از ویژگی‌های مثبت دزیمتر تولید شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

دزیمتر فسفات روی با ناخالصی لانتانیم با موفقیت ساخته شد و نتایج تحلیل XRD صحت روش به کار برده شده و مواد استفاده شده در ساختار بلوری این دزیمتر را تأیید کرد. منحنی درخشش ترمولومینسانس نمونه پس از پرتو دهی گاما ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس داده‌های به دست آمده، این منحنی از یک قله اصلی تشکیل شده که از ۳ قله همپوش در دماهای ۴۰۰، ۴۴۸ و ۵۴۸ کلین تشکیل شده است. پارامترهای سینتیکی این دو قله همپوشان با استفاده از مدل سینتیک مرتبه‌ام و روش برازش منحنی محاسبه شد. ناحیه گسترده خطی پاسخ ترمولومینسانس این دزیمتر را به گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در دزیمتری با دزهای بسیار بالا تبدیل می‌کند. سایر خصوصیات مانند محوشدگی و تکرار پذیری پاسخ ترمولومینسانس نمونه ساخته شده بررسی شد و نتایج مناسبی از این حیث نیز بدست آمد.

۵- مراجع:

- [۱] Farahmandjou, M., & Golabiyan, N. (۲۰۱۵). Solution combustion preparation of nano- Al_2O_3 : synthesis and characterization.
- [۲] Salah, N., Khan, Z. H., & Habib, S. S. (۲۰۱۱). Nanoparticles of Al_2O_3 : Cr as a sensitive thermoluminescent material for high exposures of gamma rays irradiations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۲۶۹(۴), ۴۰۱-۴۰۴.
- [۳] F. Abbasi, E. Sadeghi, M. Zahedifar, Dating two ancient samples by thermoluminescence method and the effect of the plateau region on the age of the samples. *Journal of Radiation Safety and Measurement*, ۲۰۲۲; ۱۱(۳): ۱۲۷-۱۳۲.
- [۴] F. Almasifard, E. Sadeghi, M. Zahedifar, S. Harooni'Synthesis of MgSO_4 nanoparticle doped with Cu by hydrothermal method and investigation of its thermoluminescence properties in gamma irradiation', *Journal of Radiation Safety and Measurement*, ۲۰۱۷; ۶(۲), pp. ۷-۱۲.
- [۵] Shoushtari, M. K., Zahedifar, M., & Sadeghi, E. (۲۰۱۸). Preparation and thermoluminescent dosimetry features of high sensitivity LiF:Mg,Ce phosphor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۸۸۷, ۱۲۸-۱۳۲.
- [۶] ALIVISATOS A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots [J]. *Science*, ۱۹۹۶, ۲۷۱(۵۲۵۱): ۹۳۳-۹۳۷.
- [۷] J. Wang, Q. Su, S.B. Wang, *Mater. Res. Bull.* ۴۰ (۲۰۰۵) ۵۹۰-۵۹۸.



- [۸] GU Jian-feng, YAN Bing. Controlled synthesis and photoluminescence of $\text{Zn}^{2+}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$ nanocrystal via hydrothermal process [J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, ۲۰۰۸, ۱۰(۲): ۴۰۵-۴۰۹.
- [۹] SHEN Wei-ying, LIN Jun, YU Min, HAN Xiu-mei. Citrate-gel synthesis and luminescent properties of $\alpha\text{-Zn}^{2+}(\text{PO}_4)_2$ doped with Eu^{3+} [J]. Journal of Rare Earths, ۲۰۰۴, ۲۲(۱): ۸۷-۹۰.
- [۱۰] MA Chong-geng, JIANG Sha, ZHOU Xian-ju. Energy transfer from Ce^{3+} to Tb^{3+} and Eu^{3+} in zinc phosphate glasses [J]. Journal of Rare Earths, ۲۰۱۰, ۲۸(۱): ۴۰-۴۲.
- [۱۱] LIU Yin-yao, ZOU Zhao-song, LIANG Xiao-luan, WANG Shu-fen, XING Zhong-wen, CHEN Guo-rong. Energy transfer and photoluminescence of zinc phosphate glasses co-doped with Tb^{3+} and Mn^{2+} [J]. Journal of the American Ceramic Society, ۲۰۱۰, ۹۳(۷): ۱۸۹۱-۱۸۹۳.
- [۱۲] G. G. Kitis, J.M. Gomez Ros, J.W.N. Tuyn. Thermoluminescence glow curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics, J. Phys. D:Appl. Phys. ۳۱(۱۹۹۸) ۲۶۳۶-۲۶۴۱.
- [۱۳] H. G. Balian, N. W. Eddy. Figure of merit (FOM), an improved criterion over the normalized chisquared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectra peaks. Nucl. Instr. Meth. ۱۴۵ (۱۹۷۷) ۳۸۹-۳۹۳.



بررسی امکان اندازه گیری ذرات کیهانی با استفاده از آشکارسازهای میکرونواری به روش

شبیه سازی مونت کارلو (کد مقاله : ۱۱۲۵)

شیمای جزی^۱، محمدرضا رضایی^۱، سعیده خضری پور^{۱*}

۱. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین

چکیده:

آشکارسازی و اندازه گیری ذرات کیهانی از اهمیت ویژه ای در سطح زمین و در فضا برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از پاسخ آشکارساز میکرونواری که نوعی آشکارساز گازی میکرو الگو میباشد و با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو (کد MCNPX)، امکان اندازه گیری این ذرات شامل نئون، اکسیژن، هلیوم، هیدروژن و (کربن) مورد بررسی قرار گیرد. به علت انرژی بالای این ذرات کیهانی، از کند کننده‌ی شیشه ای برای تغییر انرژی ورودی ذرات کیهانی به فضای آشکارساز میکرونواری استفاده شده است. بهینه سازی ضخامت شیشه ی کندکننده نشان می دهد که با ضخامت ۱ و (۸) سانتی متر از شیشه ی کندکننده، جریان ورودی به پیش تقویت کننده به حد مجاز می رسد و در نتیجه امکان اندازه گیری ذرات کیهانی با ضخامت ۱ و (۸) سانتی متر برای این ذرات که شامل نئون، اکسیژن، هلیوم، هیدروژن و (کربن) از ماده ی کند کننده است، فراهم میگردد.

کلمات کلیدی: گاز P^{۱۰}، کندکننده، کد MCNPX، آشکارساز میکرونواری، پرتو کیهانی

Investigating the possibility of measuring cosmic ray using microstrip detectors by Monte Carlo simulation

Shima Jazi^۱, Mohammad Reza Rezaie^۱, Saeedeh Khezripour^{۱,*}

۱. Graduate University of Advanced Technology, Faculty of Sciences and Modern Technologies

Abstract:

The detection and measurement of cosmic particles is of particular importance on the surface of the Earth and in space. In this research, an attempt has been made to investigate the possibility of measuring these particles including neon, oxygen, helium, hydrogen and (carbon) using the response of a micropatterned gas detector and Monte Carlo simulation (code MCNPX). Due to the high energy of these cosmic particles, a glass moderator has been used to change the energy input of cosmic particles to the space of the micropatterned detector. Optimization of the thickness of the moderator glass shows that with a thickness of ۱ and (۸) centimeters of the moderator glass, the input current to the preamplifier reaches the allowable limit and as a result, it is possible to measure cosmic particles with a thickness of ۱ and (۸) centimeters for these particles including neon, oxygen, helium, hydrogen and (carbon) of the moderator material.

Key words: cosmic ray, microstrip detector, MCNPX code, radiator, P^{۱۰}

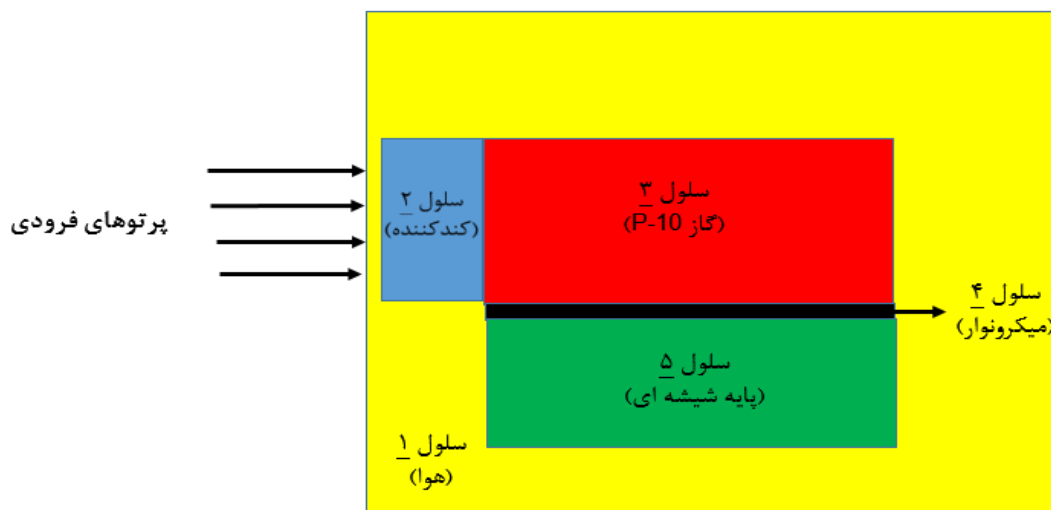


۱- مقدمه:

تاکنون از آشکارسازهای مختلفی مانند الکترومترها، گایگرمولر، اتاقک یونیزاسیون، اتاقک حباب، اتاقک جرقه‌ای و آشکارسازهای گازی برای آشکارسازی ذرات کیهانی استفاده شده است [۱]. ذرات کیهانی شامل یون‌ها، نوترون‌ها و فوتون‌های پر انرژی هستند [۲-۴]. آن‌ها از منابع مختلف خورشیدی و کیهانی در فضا به وجود آمده‌اند. این ذرات به جو زمین وارد شده و همچنین در سطح زمین هم قابل آشکارسازی هستند. تغییر شار ذرات کیهانی یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت مطالعه فعالیت‌های خورشیدی و کیهانی است. در نتیجه آشکارسازی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برای سلامت بشر برخوردار است. از آشکارسازهای گازی مانند آشکارسازهای میکرونیاری نیز در مطالعات ذرات کیهانی استفاده شده است [۵-۷]. کد MCNPX^{۲۵} یک کد هسته‌ای است که با ردیابی ذرات کیهانی می‌توان دز به جا مانده در نقاط مختلف آشکارسازهای هسته‌ای را محاسبه کرد و با استفاده از مقدار بار ایجاد شده در ناحیه‌ی حساس آشکارساز و نوارهای مسی آشکارساز را بررسی کرد [۸-۱۳]. در این تحقیق سعی می‌شود که به معرفی یک کد کننده مناسب، امکان اندازه‌گیری و ردیابی ذرات کیهانی با استفاده از یک آشکارساز میکرونیاری که با گاز p^{10} پر شده است پرداخته شود. کد کننده‌ها نقش کاهش انرژی ذرات کیهانی وارد شده به آشکارساز را به عهده دارند [۱۴]. در صورت ورود ذرات کیهانی بدون کد کننده ممکن است آشکارساز تخریب شده و جریان ورودی به تقویت کننده بیش‌تر یا کم‌تر از حد مجاز باشد. با در نظر گرفتن حداقل جریان لازم برای تقویت کننده‌های آشکارساز می‌توان ضخامت مناسب کد کننده انرژی ذرات را بررسی کرد. ضخامت بهینه بستگی به نوع ذره کیهانی دارد. در این تحقیق یکی از سنگین‌ترین ذرات کیهانی برای نمونه فرض شده است. طیف انرژی ذرات کیهانی توسط محققان مختلفی گزارش شده است که در بازه‌ی ۱-۱۰^۶ گیگا الکترون ولت بر نانو کولن می‌باشد [۱۵]. با استخراج داده‌های طیف انرژی این ذرات می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو امکان محاسبه‌ی ضخامت بهینه‌ی کد کننده را فراهم کرد. در این تحقیق از کد MCNPX برای ردیابی ذرات کیهانی در آشکارساز و بهینه‌سازی ضخامت کد کننده استفاده می‌شود. چگونگی انجام کار در مراحل بعدی در این تحقیق ذکر می‌شود.

۲- روش کار:

ساختار اصلی آشکارسازهای میکرونیاری در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) طراحی آشکارساز در کد MCNPX

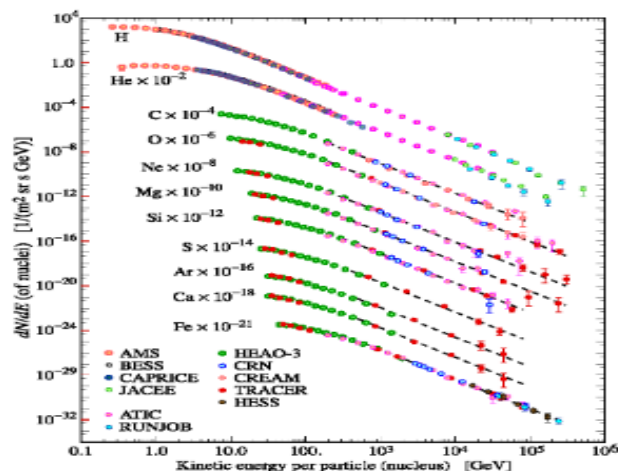


شکل ۱ یک آشکارساز را نشان می‌دهد. لایه زرد رنگ (سلول شماره ۱) حاوی هوا است. لایه آبی رنگ (سلول شماره ۲) کند کننده را نمایش می‌دهد که از جنس شیشه در نظر گرفته شده است. لایه قرمز رنگ (سلول شماره ۳) از گاز p^{10} پر شده است. لایه نازک مشکی رنگ (سلول شماره ۴) میکرونوار است که این نوارها از جنس مس هستند. لایه سبز رنگ (سلول شماره ۵) به عنوان پایه و از جنس شیشه در نظر گرفته می‌شود که نوارها به صورت لایه لایه روی آن قرار دارد. وقتی ذره پر انرژی کیهانی وارد می‌شود به دلیل انرژی بالایی که دارد می‌تواند عبور کند و وقتی این ذره در گاز برهمکنش می‌کند الکترون یا ذرات دیگری تولید می‌کند که روی هر نوار می‌آیند و نوارهای متعددی را درگیر می‌کند. نوارها هر کدام به یک مدار الکتریکی وصل هستند و بار را اندازه گیری می‌کنند و با نوارهایی که درگیر می‌شوند می‌توان پالس و مسیر ذره را شناسایی کرد. باری که روی هر لایه جمع می‌شود اگر در حد دقت آن آشکارساز باشد و به اندازه ای باشد که پیش تقویت کننده بخواند می‌توان آن را اندازه گیری کرد. بار جمع آوری می‌شود و به سمت پیش تقویت کننده می‌رود، پیش تقویت کننده آن را تقویت می‌کند و پالسی می‌دهد که می‌توان با استفاده از آن بار را اندازه گیری کرد. ذره کیهانی از محیط کند کننده (شیشه) وارد آشکارساز می‌شود. ذره پس از وارد شدن افت انرژی پیدا می‌کند و ممکن است در ناحیه قرمز رنگ (سلول شماره ۳ حاوی گاز p^{10}) متوقف شود یا هم ممکن است هنگام رد شدن انرژی به جا گذاشته شده در حد باری باشد که پیش تقویت کننده بتواند تقویت کند. دلیل استفاده از کند کننده این است که انرژی به حدی برسد که پیش تقویت کننده بتواند آن را بخواند. در این شکل نوارهای کاند و آند به ضخامت 0.1 میلی متر و پهنای نوار آند 10 میکرومتر و پهنای نوار کاتد 100 میکرومتر با گام 300 میکرومتر روی شیشه ای به ضخامت 2 میکرومتر تعبیه شده اند. در بالای نوارها یک محفظه گازی به ابعاد $10 \times 10 \times 3$ سانتی متر مکعب ماده‌ی p^{10} تعبیه شده است. لایه ی بالای گاز p^{10} یک لایه مایلر است که ضخامت آن 2 میکرومتر است. این لایه به علت رسانایی که دارد به عنوان الکتروود بالایی آشکارساز عمل می‌کند. در سمت چپ شکل یک کند کننده شیشه ای با ضخامت قابل تغییر برای کند کردن انرژی ذرات کیهانی وارد شده به فضای آشکارساز عمل می‌کند. مشخصات عناصر به کار رفته در این آشکارساز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: عناصر به کار رفته شده در این آشکارساز

نوع ماده	چگالی (g/cm^3)	C	H	O	Ar	N
P^{10}	۰/۰۰۱۵۶۱	۰/۰۷۱۴۲۹	۰/۲۸۵۷۱۴	-	۰/۶۴۲۸۵۷	-
مایلر	۱/۳۸	۰/۴۵۴۵۵۲	۰/۳۶۳۶۳۲	۰/۱۸۱۸۱۶	-	-
هوا	۰/۰۰۱۲۰۵	۰/۰۰۰۱۵	-	۰/۲۱۰۷۴۸	۰/۰۰۴۶۷	۰/۷۸۴۴۳۱

طیف ذرات کیهانی نیز از منابع معتبر استخراج شده است [۱۶]. این طیف انرژی بین بازه‌ی 10^6 - 10^8 گیگا الکترون ولت قرار دارد. نمودار این طیف در شکل ۲ ذکر شده است.



شکل (۲) طیف انرژی ذرات کیهانی [۱۶]

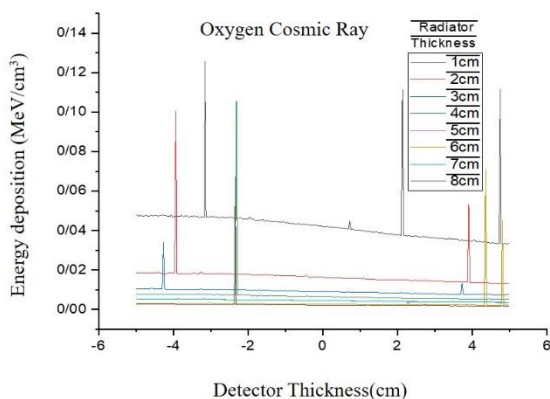
داده‌های ذکر شده در طیف شکل ۲ با استفاده از معادله‌ی (۱) بدست آمده است.

$$I(E) = 1/8 \times 10^4 E^{-2/7} \quad (1)$$

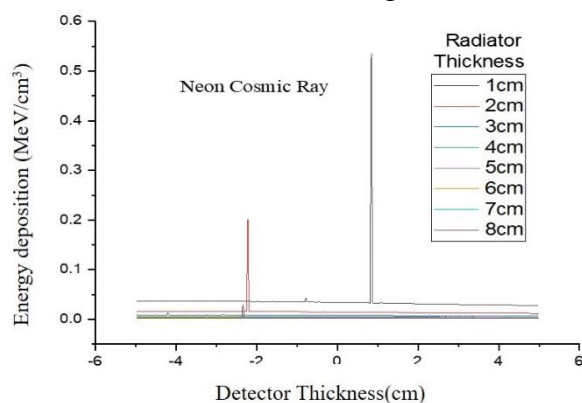
به علت اینکه در معادله‌ی (۱) انرژی به ازای یک نوکلئون است، انرژی‌ها در عدد جرمی ذره کیهانی ضرب شده‌اند. داده‌های جدول ۱، شکل ۲ و هندسه معرفی شده در شکل ۱ به عنوان یک فایل ورودی در کد MCNPX وارد شده‌اند. تعداد ذرات برای آشکارسازی 10^8 ذره برای رسیدن به خطای زیر یک درصد در نظر گرفته شده است. از مش تالی نوع ۱ با دستور PEDEP انرژی به جا مانده بر حسب MeV/cm^3 در ناحیه‌ی بالایی ناحیه‌ی حساس آشکارساز هر یک از نوارهای کاتد آشکارساز استخراج گردید. ضرایب لازم برای تبدیل انرژی به بار ایجاد شده در نوار اعمال شد. با تغییر ضخامت کند کننده پاسخ جریان آشکارساز و بار ایجاد شده در هر یک از نوارها برای رسیدن به کمترین مقدار جریان لازم برای آشکارسازی آشکارساز میکرونیاری در آشکارسازی ذرات کیهانی بهینه‌سازی می‌شود.

۳- نتایج:

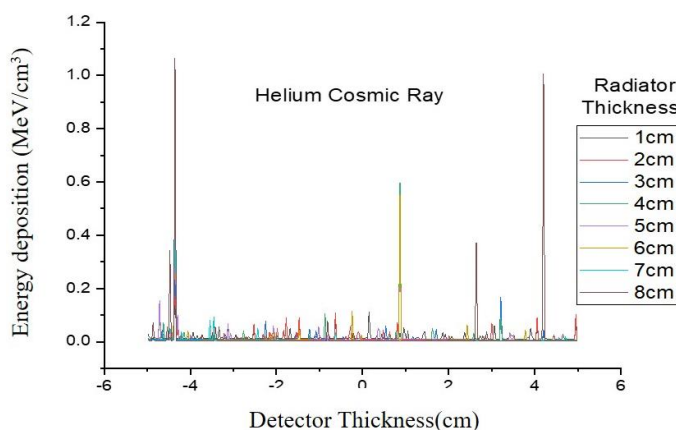
نمودار انرژی به جا مانده در آشکارساز را با لایه‌ی کند کننده شیشه‌ای به ازای ذرات مختلف کیهانی در شکل‌های ۳-الف تا ۳-ه نمایش داده شده است.



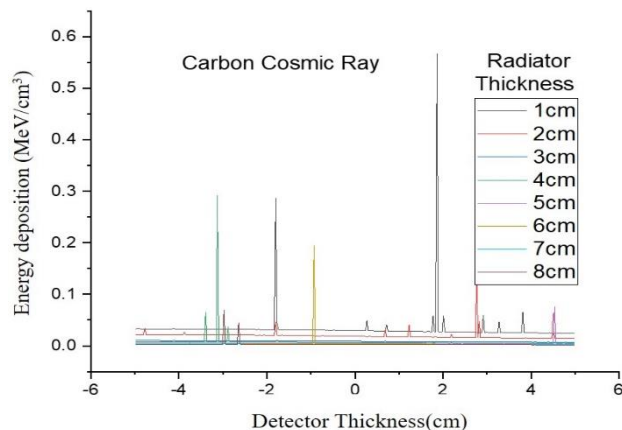
شکل (۳-ب) طیف انرژی ذرات کیهانی برای اکسیژن



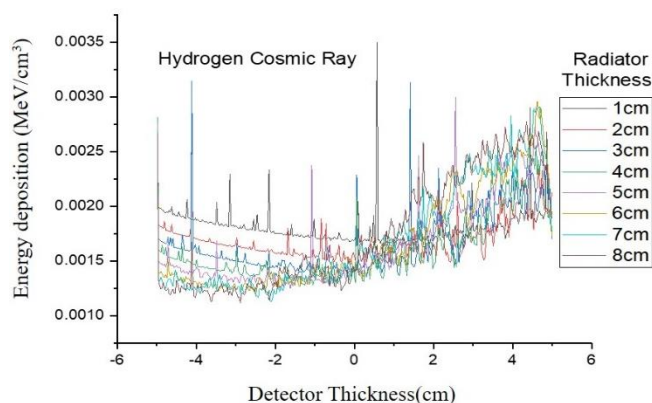
شکل (۳-الف) طیف انرژی ذرات کیهانی برای نئون کیهانی



شکل (۳-د) طیف انرژی ذرات کیهانی برای هلیوم

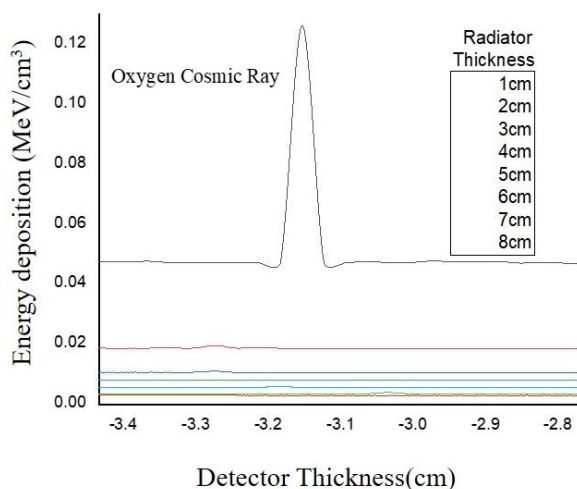


شکل (۳-ج) طیف انرژی ذرات کیهانی برای کربن

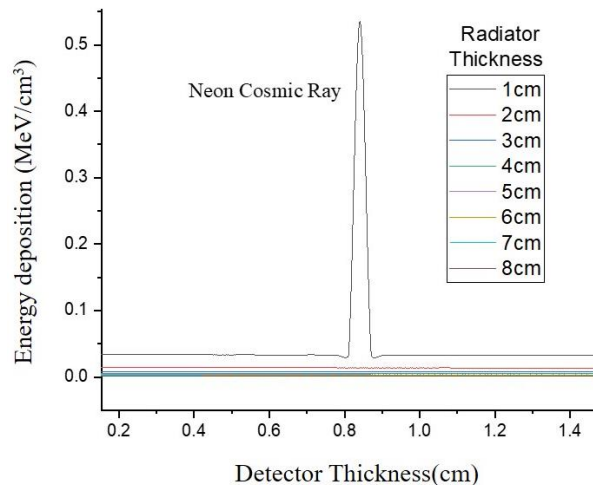


شکل (۳-ه) طیف انرژی ذرات کیهانی برای هیدروژن

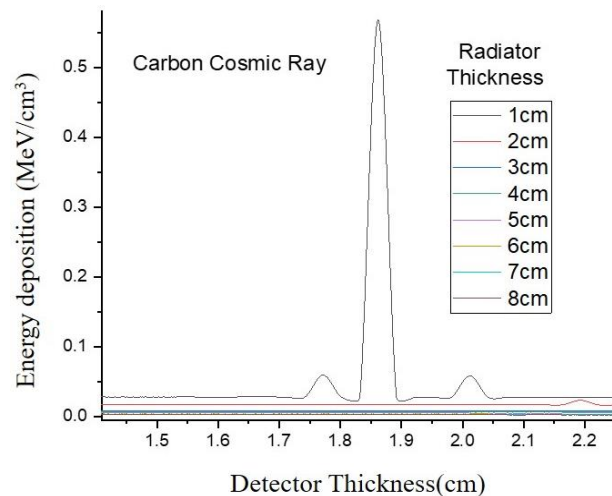
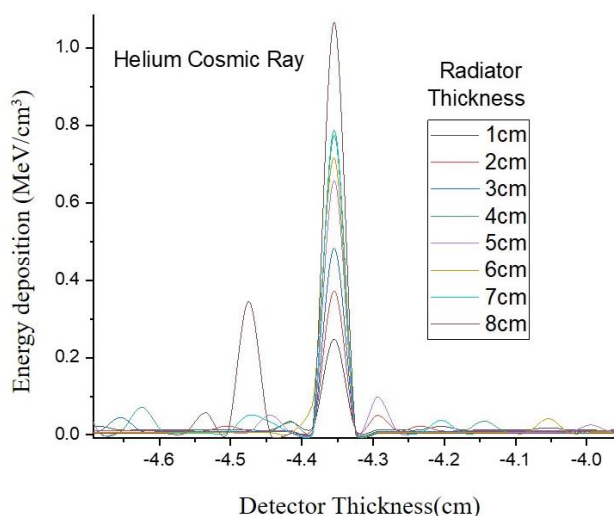
ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت‌های بهینه کند کننده به ازای ذرات مختلف کیهانی در شکل های ۴-الف تا ۴-ه نشان داده شده است.



شکل (۴-ب) ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت بهینه برای اکسیژن

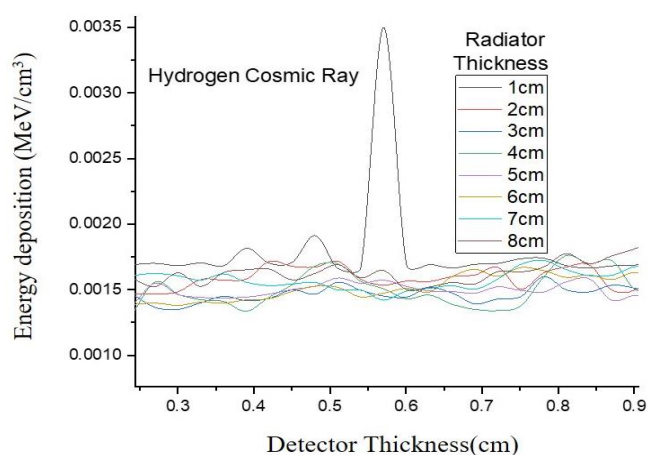


شکل (۴-الف) ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت بهینه برای نئون



شکل (۴-د) ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت بهینه برای هلیوم

شکل (۴-ج) ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت بهینه برای کربن



شکل (۴-ه) ماکزیمم پاسخ آشکارساز در ضخامت بهینه برای هیدروژن

با تقسیم پاسخ آشکارساز هر نوار به پاسخ آشکارساز نوار اولی نسبت $I/I' = q/q'$ به دست می‌آید که نشان دهنده‌ی نسبت جریان آشکارساز و نسبت بار هر یک از لایه‌های آشکارساز است. جدول ۲ ماکزیمم انرژی جذب شده در نوارهای آشکارساز را با لایه‌ی کند کننده در ضخامت بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۲: ماکزیمم انرژی جذب شده در نوارهای آشکارساز با لایه‌ی کند کننده

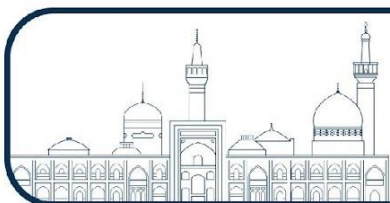
Hydrogen	Helium	Carbon	Oxygen	Neon	Cosmic ray
۰.۵۷	-۴.۳۵	۱.۸۶	-۳.۱۵	۰.۸۴	position Mesh (cm)
۰.۰۰۳۵	۱.۰۶۶	۰.۵۷	۰.۱۳	۰.۵۴	Energy deposit (Mev/cm³)



جهت اعتبار سنجی روش شبیه سازی آشکارساز میکرونواری با کد MCNPX رضایی و همکاران طیف سنجی ذرات الفای رادن و دختران با ضریب تعادلی را با نتایج عملی مقایسه کردند . و همخوانی بالای ۸۰٪ مشاهده شد [۱۷].

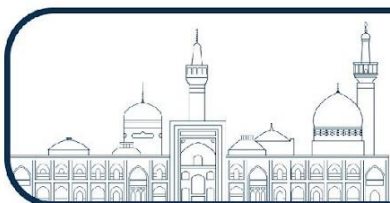
۴- بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق با تعبیه ی یک لایه ی کند کننده برای آشکارسازهای میکرونواری پاسخ آشکارساز به عبور ذرات کیهانی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که با تغییر ضخامت لایه ی کند کننده تغییر میزان انرژی به جا مانده نیز تغییر می کند. نتایج نشان می دهد که مناسب ترین ضخامت لایه ی کند کننده شیشه ای برابر ۸ سانتی متر برای کربن ۱ سانتی متر برای ذرات نئون، اکسیژن، هلیوم و هیدروژن های کیهانی است. در نتیجه از آشکارسازهای میکرونواری با لایه ی کند کننده شیشه ای با ضخامت ۱ و ۸ سانتی متر، امکان آشکارسازی و ردیابی ذرات کیهانی وجود دارد.



۵- مراجع:

- [۱] Zeitlin, C., *Cosmic ray detectors: Principles of operation and a brief overview of (mostly) US flight instruments*. THREE Encyclopedia: The Health Risks of Extraterrestrial Environments, ۲۰۱۲.
- [۲] Boezio, M., R. Munini, and P. Picozza, *Cosmic ray detection in space*. Progress in Particle and Nuclear Physics, ۲۰۲۰. ۱۱۲: p. ۱۰۳۷۶۵.
- [۳] Lidvansky, A., *Who discovered cosmic rays, and when?* Uspekhi Fizicheskikh Nauk, ۲۰۲۴. ۱۹۴(۹): p. ۹۹۹-۱۰۰۶.
- [۴] Kakani, S. and S. Kakani, *Nuclear and particle physics*. ۲۰۰۸.
- [۵] Sauli, F. and A. Sharma, *Micropattern gaseous detectors*. Annual Review of Nuclear and Particle Science, ۱۹۹۹. ۴۹(۱): p. ۳۴۱-۳۸۸.
- [۶] Sauli, F., *Micro-pattern gas detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۰۲. ۴۷۷(۱-۳): p. ۱-۷.
- [۷] Sauli, F. and R. Bouclier, *Development of micro-strip gas chambers for radiation detection and tracking at high rates: status report to the DRDC open meeting, September 2, 1993*. ۱۹۹۳.
- [۸] Hassanpour, M., et al., *The application of graphene/h-BN metamaterial in medical linear accelerators for reducing neutron leakage in the treatment room*. Physical and Engineering Sciences in Medicine, ۲۰۲۳. ۴۶(۳): p. ۱۰۲۳-۱۰۳۲.
- [۹] Khezripour, S., N. Zarei, and M. Rezaie, *Estimation of granite radiation hazards of Deh Siah village in Rafsanjan city*. Journal of Instrumentation, ۲۰۲۲. ۱۷(۰۸): p. T۰۸۰۱۱.
- [۱۰] Khezripour, S., et al., *Investigating the hard X-ray production via proton spallation on different materials to detect elements*. PloS One, ۲۰۲۳. ۱۸(۸): e۰۲۸۸۲۸۷.
- [۱۱] Nejad, M.R.R.R., S. Khezripour, and A. Nouraddini, *Monte Carlo Simulation of Radioactive Elements Production in Tissues by Spallation in Cancer Therapy*. Frontiers in Biomedical Technologies, ۲۰۲۴.
- [۱۲] K ulahcı, F., S. Ak zcan, and O. G n y, *Monte Carlo simulations and forecasting of Radium-226, Thorium-232, and Potassium-40 radioactivity concentrations*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, ۲۰۲۰. ۳۲۴: p. ۵۵-۷۰.
- [۱۳] Ayg n, B., et al., *Experimental and Monte Carlo simulation study on potential new composite materials to moderate neutron-gamma radiation*. Progress in Nuclear Energy, ۲۰۲۰. ۱۳۰: p. ۱۰۳۵۳۸.
- [۱۴] Hale, S., et al., *Detector bandwidth and polarisation switching rates*. ۲۰۲۳.
- [۱۵] Giacalone, J., et al., *Anomalous cosmic rays and heliospheric energetic particles*. Space Science Reviews, ۲۰۲۲. ۲۱۸(۴): p. ۲۲.
- [۱۶] Bonomi, G., Checchia, P., D'Errico, M., Pagano, D., & Saracino, G. (۲۰۲۰). Applications of cosmic-ray muons. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 112, ۱۰۳۷۶۸.
- [۱۷] Hassanpour, M., Dehghanipour, P., Rezaie, M., Hassanpour, M., Faruque, M.R.I. and Khandaker, M.U., ۲۰۲۲. Study of alpha spectrometry for detection of radon and progeny using gas micro-strip detector. Applied Radiation and Isotopes, ۱۸۷, p.۱۱۰۳۴۴.



بررسی پارامترهای اصلی آشکارساز عبوری برای استفاده در طیف‌سنج زمان پرواز آلفا (کد

مقاله : ۱۱۲۷)

عزیزی، مریم^۱-قاسمی، بهجت^۱-کاکویی، امیدرضا^۲-بیگانه، علی^۲

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، گروه فیزیک تجربی و کاربردی،

چکیده:

آشکارساز عبوری مبتنی بر فویل، رایج‌ترین آشکارساز در طیف‌سنج‌های زمان پرواز آلفا است. با توجه به اینکه بازدهی و قدرت تفکیک زمانی طیف‌سنج به عملکرد این آشکارساز بستگی دارد، لازم است شرایط هندسی و ولتاژ آن به گونه‌ای تعیین شود که الکترون‌هایی که در اثر برخورد آلفا با فویل کربنی گسیل می‌شوند، با زاویه ۹۰ درجه منحرف شده و به سمت آشکارساز الکترون هدایت شوند. همچنین پهن‌شدگی زمان عبور آن‌ها کمینه شود تا قدرت تفکیک زمانی طیف‌سنج بهبود یابد. در این مقاله، طراحی آشکارساز عبوری برای استفاده در طیف‌سنج زمان پرواز آلفا مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی مسیر الکترون‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که نسبت اختلاف پتانسیل بین دو توری آینه‌ای به اختلاف پتانسیل بین فویل و توری شتابدهی بزرگ‌تر از ۱ و فواصل سیم‌های توری ۱ mm باشد، شرایط هندسی و الکتریکی مناسب برای آشکارساز عبوری فراهم خواهد شد.

کلمات کلیدی: طیف‌سنج زمان پرواز (TOF)، آشکارساز عبوری، نرم‌افزار CST

Investigating key parameters of the transmission detector in an Alpha Time-Of-Flight (A-TOF) spectrometer

Azizi, Maryam^۱; Ghasemi, Behjat^۱; Kakuee, Omidreza^{۲*}; Biganeh, Ali^۲

۱. Department of Radiation Application, Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University

۲. Physics & Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

Abstract:

The foil-based transmission detector is the most common type of detector in alpha TOF spectrometers. Since the efficiency and time resolution of the spectrometer depend on the performance of this detector, it is necessary to determine its geometric and voltage conditions such that the electrons emitted by the collision of alpha particles with the carbon foil are deflected at a 90-degree angle and directed towards the electron detector. Additionally, their transit time spread should be minimized to improve the time resolution of the spectrometer. In this study, the design of the transmission detector for use in an alpha TOF spectrometer is investigated. Electron trajectory simulations were performed using CST software. The results indicate that if the ratio of the potential difference between the two mirror grids to the potential difference between the foil and the acceleration grid exceeds 1, and if the wire-to-wire spacing is set at 1 mm, then the geometrical and voltage conditions for the transmission detector are satisfied.

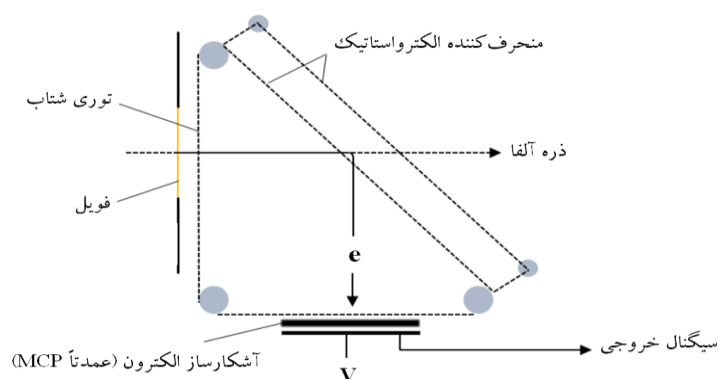
Key words: Time-Of-Flight spectrometer (TOF), Transmission detector, CST software



۱ - مقدمه:

اندازه‌گیری به روش زمان پرواز ($^{26} \text{TOF}$) به دلیل قدرت تفکیک انرژی بسیار خوبی که ارائه می‌دهد، در تعیین داده‌های واپاشی گسیلنده‌های آلفا (مانند شاخه‌های انشعاب و احتمال گسیل) بسیار کارآمد خواهد بود [۱، ۲]. در این روش با قرار دادن دو آشکارساز در مسیر پرواز ذره آلفا، اختلاف بین سیگنال‌های زمانی ثبت شده توسط آشکارسازهای شروع و پایان اندازه‌گیری شده و با در اختیار داشتن طول پرواز (فاصله بین آشکارسازهای شروع و پایان)، سرعت ذره آلفا و به تبع آن، انرژی آن قابل تعیین است. استفاده از روش زمان پرواز در کاربردهای مربوط به یون‌ها در مقایسه با نوترون ملاحظات بیشتری دارد. این ملاحظات شامل برقراری میزان خلاء بالا در لوله پرواز، استفاده از آشکارسازهای شروع و پایان با ساختار هندسی مناسب و غیره است که به طور کامل توسط تورانو^{۲۷} مورد بررسی قرار گرفته است [۱].

اگرچه انتخاب آشکارساز پایان برای استفاده در این ابزار تحت تاثیر عوامل زیادی از جمله کاربرد خاص طیف‌سنج قرار می‌گیرد، اما آشکارسازهای شروع عمدتاً از همان مفاهیم پایه‌ای مربوط به آشکارسازهای عبوری^{۲۸} که در سال ۱۹۸۰ توسط بوش^{۲۹} و همکارانش ارائه شد، استفاده می‌کنند [۳]. اجزای تشکیل‌دهنده آشکارساز عبوری که معمولاً آشکارساز TOF نیز نامیده می‌شود، عبارت‌اند از: (۱) فویل، به منظور تولید الکترون‌های ثانویه (۲) توری شتابدهی، برای شتابدهی به الکترون‌های ثانویه گسیل شده از فویل (۳) توری آینه‌ای یا به عبارتی منحرف‌کننده الکترواستاتیک متشکل از دو توری داخلی و بیرونی، برای انحراف الکترون‌ها به سمت آشکارساز الکترونی و (۴) آشکارساز الکترونی برای ثبت الکترون‌های ثانویه. در شکل ۱ طرحی از نحوه قرارگیری اجزای تشکیل‌دهنده آشکارساز عبوری نشان داده شده است.



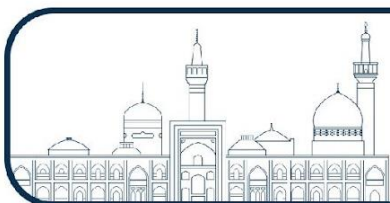
شکل (۱) طرحی از آشکارسازهای عبوری مبتنی بر فویل

^{۲۶} Time-Of-Flight

^{۲۷} Toraño

^{۲۸} Transmission detector

^{۲۹} Busch



در این ساختار، ذره آلفا فرودی وارد یک فویل نازک کربنی می‌شود و با به‌جا گذاشتن انرژی در داخل آن، الکترون‌هایی با انرژی در حدود چند الکترون ولت از آن گسیل می‌شود [۴-۶]. این الکترون‌ها توسط یک توری شتابدهی به اندازه‌ای شتاب می‌گیرند که بتوانند یک سیگنال معتبر را تولید کنند. سپس یک منحرف‌کننده الکترواستاتیک الکترون‌ها را به سمت آشکارساز الکترونی هدایت می‌کند و بدین ترتیب سیگنال زمانی ثبت می‌شود. از میان آشکارسازهای موجود برای آشکارسازی الکترون‌های ثانویه منحرف‌شده، صفحات میکروکانال (MCP^{30}) بیشترین استفاده را دارند. آشکارساز صفحه میکروکانال شامل مجموعه‌ای از کانال‌های بسیار کوچک است که به‌عنوان تکثیرکننده بار فرودی عمل می‌کنند [۷]. این آشکارسازها دارای خصوصیات زمانگیری بسیار خوبی هستند و بازدهی آشکارسازی آن‌ها برای الکترون‌هایی که در اینجا در نظر گرفته می‌شوند، می‌تواند بیش از ۵۰٪ باشد [۷-۱۰].

بازدهی و قدرت تفکیک زمانی یک طیف‌سنج زمان پرواز تا حد زیادی به عملکرد آشکارسازهای شروع و پایان بستگی دارد. لذا شرایط هندسی و ولتاژ توری‌های آشکارساز عبوری باید به نحوی تعیین گردد که ابتدا الکترون‌های گسیلی از فویل تحت زاویه ۹۰ درجه توسط منحرف‌کننده الکترواستاتیک تغییر جهت داده و به سمت آشکارساز الکترون بروند و علاوه بر آن، پهن‌شدگی در زمان عبور آن‌ها از فویل به سمت MCP کمینه شود تا قدرت تفکیک زمانی بهبود یابد. در تحقیقات متعددی به طراحی این آشکارسازهای عبوری پرداخته شده است [۱۱-۱۳]. به عنوان مثال لایتینن^{۳۱} و همکاران [۱۱] با استفاده از نرم افزار SIMION به بررسی تاثیر فاصله‌ی بین سیم‌ها و ولتاژ روی توری‌ها بر روی پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها پرداختند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط آن‌ها نشان داد که با کاهش فاصله بین سیم‌ها و افزایش ولتاژ شتابدهی و ولتاژ توری‌های آینه‌ای، پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها از فویل به سمت آشکارساز کاهش می‌یابد. در این پژوهش به منظور تعیین ولتاژ بهینه اعمالی به توری‌ها با هدف انحراف ۹۰ درجه الکترون‌ها به سمت آشکارساز و همچنین برای تعیین فواصل سیم‌های تشکیل‌دهنده توری‌ها با هدف کاهش پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها از فویل به سمت آشکارساز الکترونی، از نرم‌افزار CST^{32} استفاده شده است.

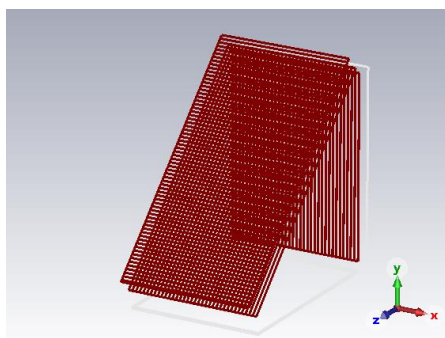
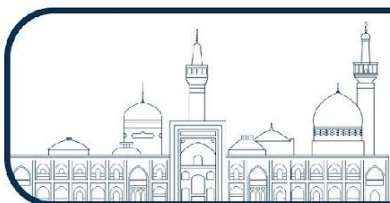
۲- روش کار:

طرح اولیه از آشکارساز عبوری که با استفاده از نرم‌افزار CST طراحی شده است، در شکل ۲ نشان داده شده است. در طرح اولیه توری‌ها متشکل از سیم‌هایی با قطر 0.4 mm است که با گام مشخصی از یکدیگر قرار دارند تا یک میدان الکتریکی یکنواخت ایجاد شود. توری در فاصله 10 mm از مکان تولید الکترون (فویل) قرار گرفته است. آینه الکترواستاتیک نیز متشکل از دو توری داخلی و خارجی است که به فاصله 10 mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این توری‌ها نیز همانند توری شتابدهی متشکل از سیم‌هایی با قطر 0.4 mm هستند. همچنین یک چشمه الکترونی (به عنوان الکترون‌های ثانویه) در موقعیت فویل تعریف شد.

^{۳۰} Micro Channel plate

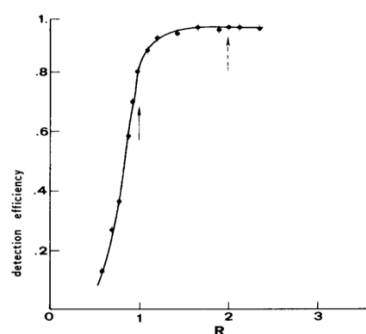
^{۳۱} Laitinen

^{۳۲} Computer Simulation Technology



شکل (۲) هندسه شبیه‌سازی شده از توری‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST

به منظور ترابرد الکترون‌های گسیلی از فویل به سمت MCP و جمع‌آوری مناسب آن‌ها پارامتر R که به صورت نسبت اختلاف پتانسیل بین دو توری آینه‌ای به اختلاف پتانسیل بین فویل و توری شتابدهی تعریف می‌شود، نقش مهمی ایفا می‌کند. به منظور بررسی وابستگی بازدهی آشکارسازی به مقدار R ، اندازه‌گیری‌هایی برای آشکارسازی ذرات آلفا توسط بوکاچو^{۳۳} و همکاران [۱۴] انجام شده است. نتایج اندازه‌گیری آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳) بازدهی آشکارسازی برحسب تابعی از مقادیر R برای ذرات آلفا گسیلی از چشمه کالیفرنیم [۱۴]

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بازدهی آشکارسازی برای مقادیر $R \geq 1/2$ کاهش شدیدی را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی حاضر، ولتاژهای اعمالی به توری شتابدهی و توری آینه‌ای داخلی و آشکارساز MCP یکسان در نظر گرفته شد به طوری ناحیه مثلثی داخل عاری از میدان الکتریکی^{۳۴} شده و منجر به انحراف الکترون‌ها به سایر جهات ناخواسته نشود. سپس ولتاژ اعمالی به فویل و توری آینه‌ای بیرونی تغییر داده شد و در نهایت به گونه‌ای تنظیم شدند که الکترون تحت زاویه ۹۰ درجه به سمت فویل تغییر جهت دهند و بدین ترتیب سیگنال الکترون‌ها ثبت شود. در گام بعدی با توجه به اینکه شفافیت هندسی توری‌ها یا به عبارتی فواصل سیم‌های تشکیل‌دهنده توری‌ها در پهن‌شدگی زمانی ترابرد الکترون‌ها تاثیرگذار است، مسیر ترابرد

^{۳۳}BOCCACCIO

^{۳۴}Free field



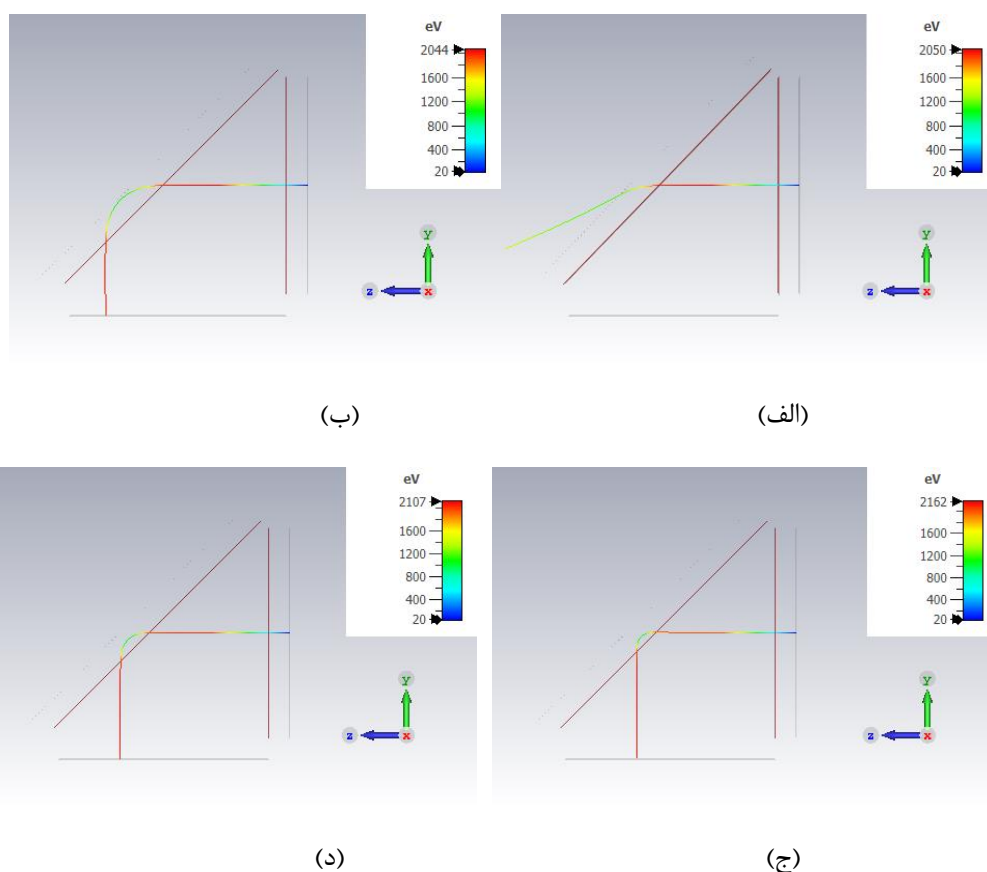
الکترون‌ها برای حالت‌هایی که فاصله سیم‌های تشکیل‌دهنده توری‌ها ۳، ۲، ۱ و 0.5 mm باشد، شبیه‌سازی شد و در هر مورد پهن‌شدگی در زمان عبور آن‌ها به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی در بخش بعدی ارائه شده است.

۳- نتایج:

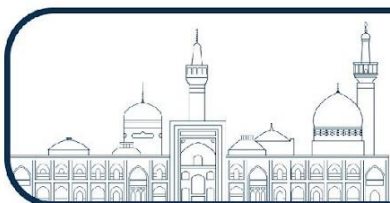
لازم به ذکر است، با توجه به اینکه برای حل عددی در نرم‌افزار CST، هندسه به المان‌های (مش) کوچکی تقسیم شده و معادلات برای هرکدام از آن المان‌ها حل می‌شود، لذا ابتدا به منظور بهینه‌سازی ابعاد مش و عدم وابستگی نتایج به مش‌بندی هندسه، با تغییر ابعاد المان‌ها نتایج حاصل بررسی شد و بازه مش‌بندی مناسب برای مسئله تعیین شد.

۳-۱- تاثیر ولتاژ اعمالی به توری‌ها

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش پارامتر R ، الکترون گسیلی از فویل در فاصله بین توری‌های آینه‌ای منحرف شده و به سمت آشکارساز الکترون تغییر جهت می‌دهند. بنابراین انتظار می‌رود بازدهی آشکارسازی افزایش یابد. ولتاژ اعمالی نهایی به فویل و توری آینه‌ای بیرونی برای دستیابی به این هدف در جدول ۱ ارائه شده است.

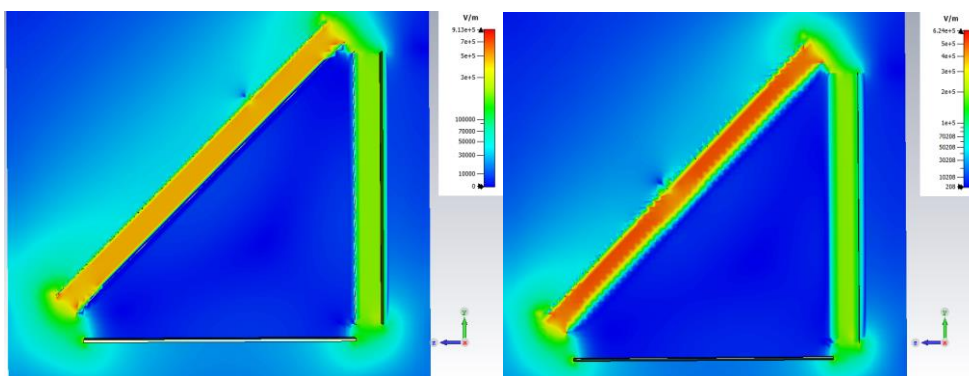


شکل (۴) شبیه‌سازی مسیر الکترون با استفاده از CST به ازای مقادیر مختلف از R . (الف) 0.4 ، (ب) 0.5 ، (ج) 1 و (د) 1.5



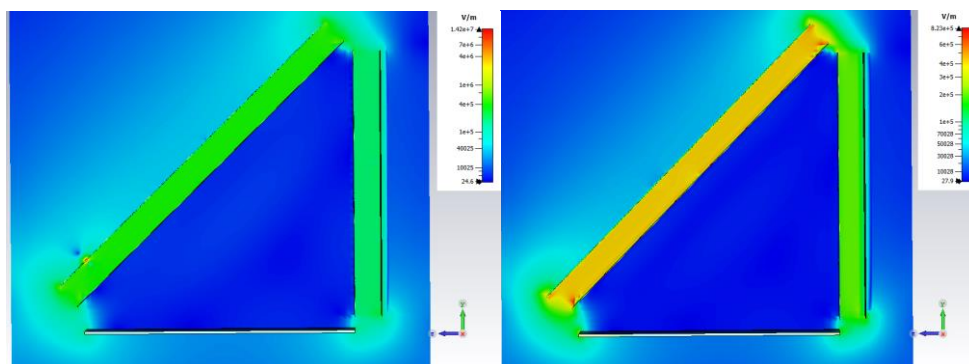
۲-۳- تاثیر فواصل سیم‌های توری

نقشه میدان الکتریکی و مسیر حرکت الکترون‌ها در حالت‌های مختلف (توری‌هایی با شفافیت هندسی مختلف) به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است.



(ب)

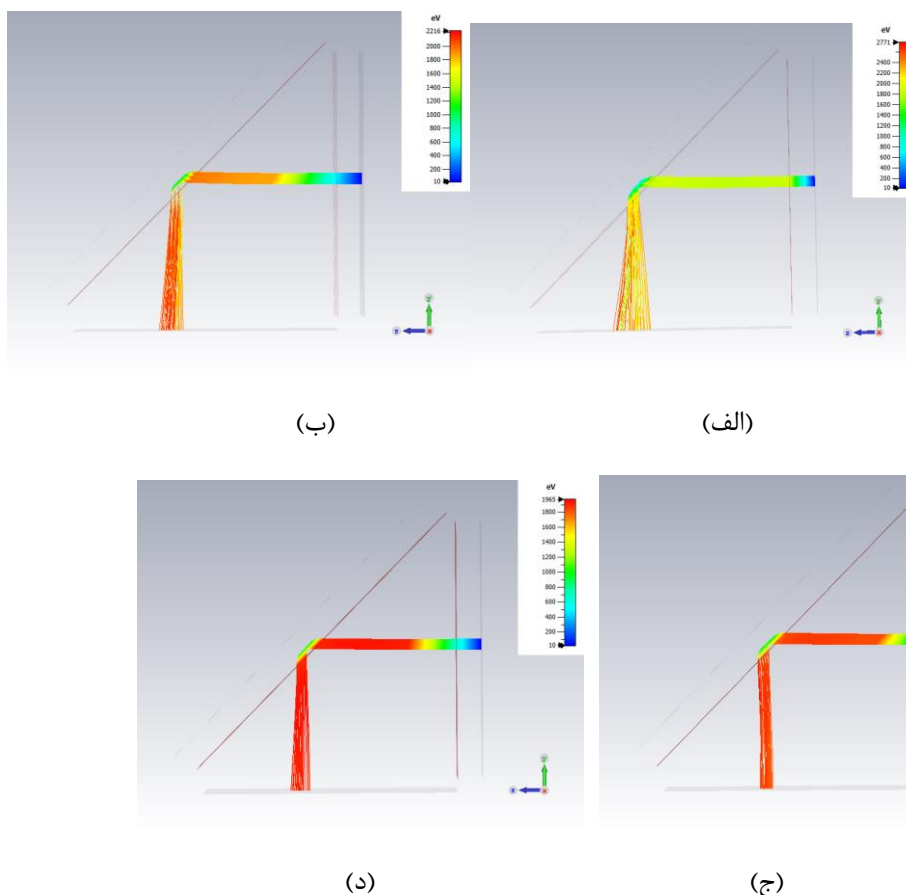
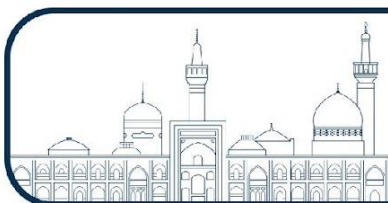
(الف)



(د)

(ج)

شکل (۵) نقشه میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده با CST برای سیم‌هایی با فواصل مختلف. (الف) ۳ mm، (ب) ۲ mm، (ج) ۱ mm و (د) ۰/۵ mm

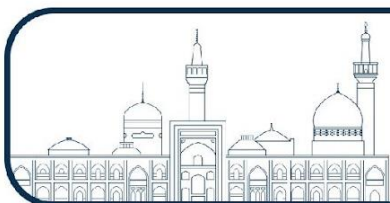


شکل (۶) شبیه‌سازی مسیر حرکت الکترون‌ها با CST برای فواصل سیم‌های مختلف. (الف) ۳ mm، (ب) ۲ mm، (ج) ۱ mm و (د) ۰/۵ mm

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در صورتی که فواصل سیم‌های تشکیل‌دهنده توری بزرگ باشد، منجر به پهن‌شدگی در ترابرد الکترون‌ها به سمت آشکارساز می‌شود. بنابراین لازم است از فواصل سیم‌های کمتر استفاده کرد که میدان الکتریکی یکنواختی را ایجاد کرده و پهن‌شدگی در ترابرد الکترون‌ها به سمت آشکارساز را نیز کمتر می‌کند. از سوی دیگر با توجه به اینکه با کاهش فاصله بین سیم‌های توری، شفافیت هندسی آشکارساز کاهش می‌یابد، بنابراین فاصله ۱ mm انتخاب مناسبی برای گام سیم‌های توری است. پارامترهای طراحی آشکارساز عبوری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: پارامترهای طراحی آشکارساز عبوری مبتنی بر فویل

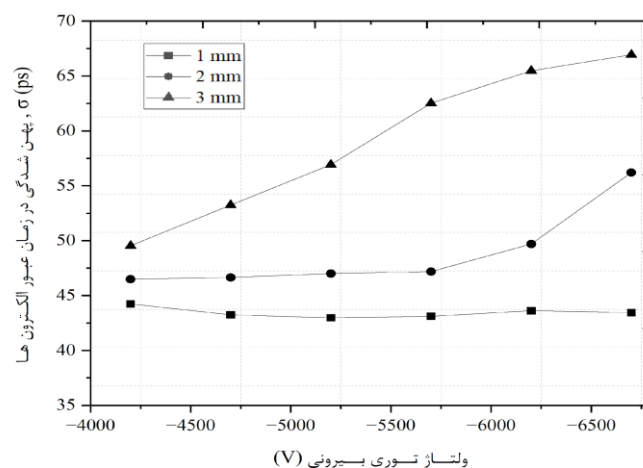
پارامتر	مقدار
قطر سیم‌های توری‌ها	۰.۴/۰ mm
فواصل بین سیم‌های توری	۱ mm
ولتاژ فویل	-۴۲۰۰ V
ولتاژ توری بیرونی	-۵۲۰۰ V
ولتاژ توری شتابدهی، توری داخلی و MCP	-۲۲۰۰ V



براساس پارامترهای طراحی آشکارساز عبوری (جدول ۱)، در صورتی که نسبت اختلاف پتانسیل بین دو توری آینه‌ای به اختلاف پتانسیل بین فویل و توری شتابدهی بزرگ‌تر از ۱ و فاصله‌ی سیم‌های توری ۱ mm باشد، شرایط هندسی و الکتریکی مناسب برای آشکارساز عبوری فراهم خواهد شد. این نتایج که برای ارزیابی تاثیر فاصله‌ی سیم‌های تشکیل‌دهنده توری و اختلاف پتانسیل بین توری‌ها بر ترابرد الکترون‌ها از فویل تا آشکارساز الکترونی انجام شد، با یافته‌های سایر تحقیقات که با استفاده از نرم‌افزار SIMION انجام شده است [۱۱-۱۳]، همخوانی دارد.

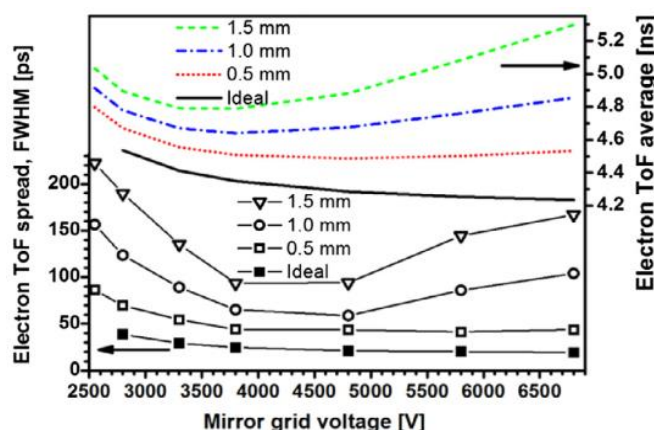
۳-۳- پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها

یکی از عوامل مهمی که منجر به کاهش قدرت تفکیک زمانی طیف‌سنج زمان پرواز آلفا می‌شود، پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها از فویل تا آشکارساز الکترونی است. در شکل ۷ تاثیر فواصل سیم‌های توری‌ها بر پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌های ثانویه به ازای ولتاژهای مندرج در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل (۷) پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها از فویل تا آشکارساز الکترونی به ازای فواصل سیم مختلف

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با کاهش فواصل سیم‌ها، پهن‌شدگی در زمان عبور الکترون‌هایی که از فویل گسیل شده و به سمت آشکارساز الکترونی تغییر جهت داده‌اند، کمتر شده است که این مهم در دستیابی به قدرت تفکیک زمانی مطلوب برای طیف‌سنج زمان پرواز موثر است. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزار CST در ارزیابی پهن‌شدگی زمانی عبور الکترون‌ها (به ازای فواصل سیم ۱ mm)، با یافته‌های لایتینن (شکل ۸) که مبتنی بر شبیه‌سازی با نرم‌افزار SIMION است، مطابقت دارد. تفاوت اندک در مقادیر بدست آمده ممکن است ناشی از اختلاف در ابعاد کلی توری‌ها و فواصل آن‌ها نسبت به یکدیگر باشد.



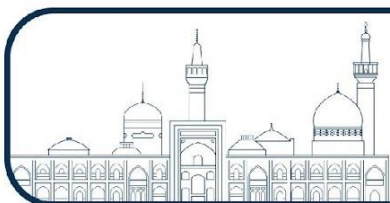
شکل (۸) پهن‌شدگی زمان عبور الکترون‌ها بر حسب تابعی از ولتاژ توری آینه‌ای [۱۱]

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

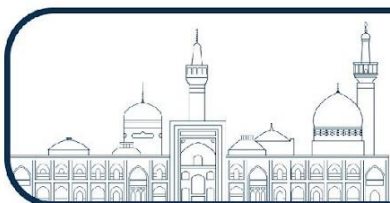
در این تحقیق، طراحی آشکارساز عبوری برای استفاده در طیف‌سنج زمان پرواز آلفا با استفاده از نرم‌افزار CST مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شرایط هندسی و ولتاژ این آشکارسازها تاثیر قابل توجهی بر هدایت الکترون‌های گسیلی به سمت آشکارساز الکترون دارند و می‌توانند پهن‌شدگی زمان هدایت آن‌ها را کاهش دهند. با توجه به اینکه طیف‌سنج زمان پرواز ابزاری با قدرت تفکیک بسیار خوب در اندازه‌گیری انرژی ذرات آلفا مطرح است، لذا شناسایی و بهینه‌سازی پارامترهایی که ممکن است منجر به کاهش قدرت تفکیک زمانی و بازدهی آشکارسازی شوند، امری ضروری است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده بر روی بهینه‌سازی بیشتر این پارامترها و بررسی تاثیر آن‌ها بر عملکرد کلی طیف‌سنج متمرکز شود.

۵- مراجع:

- [۱] García-Toraño, E., *Concept design of a time-of-flight spectrometer for the measurement of the energy of alpha particles*. Applied Radiation and Isotopes, ۲۰۱۸. ۱۳۴: p. ۲۱۹-۲۲۴.
- [۲] Pommé, S., *Radionuclide metrology: confidence in radioactivity measurements*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, ۲۰۲۲. ۳۳۱(۱۲): p. ۴۷۷۱-۴۷۹۸.
- [۳] Busch, F., et al., *A position-sensitive transmission time detector*. Nuclear Instruments and Methods, ۱۹۸۰. ۱۷۱(۱): p. ۷۱-۷۴.
- [۴] Allegrini, F., R. Ebert, and H. Funsten, *Carbon foils for space plasma instrumentation*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, ۲۰۱۶. ۱۲۱(۵): p. ۳۹۳۱-۳۹۵۰.
- [۵] Arnold, C., et al., *Development of position-sensitive time-of-flight spectrometer for fission fragment research*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۴. ۷۶۴: p. ۵۳-۵۸.



- [۶] Hasselkamp, D., S. Hippler, and A. Scharmann, *Ion-induced secondary electron spectra from clean metal surfaces*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, ۱۹۸۶. ۱۸(۱): p. ۵۶۱-۵۶۵.
- [۷] Gys, T., *Micro-channel plates and vacuum detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۵. ۷۸۷: p. ۲۵۴-۲۶۰.
- [۸] Genat, J.-F., et al., *Signal processing for picosecond resolution timing measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۰۹. ۶۰۷(۲): p. ۳۸۷-۳۹۳.
- [۹] Lehmann, A., et al., *Recent developments with microchannel-plate PMTs*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۷. ۸۷۶: p. ۴۲-۴۷.
- [۱۰] Mizota, T., et al., *Timing properties of a stop detector for a time-of-flight system*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۱۹۹۱. ۳۰۵(۱): p. ۱۲۵-۱۲۸.
- [۱۱] Laitinen, M., et al., *Secondary electron flight times and tracks in the carbon foil time pick-up detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۲۰۱۴. ۳۳۶: p. ۵۵-۶۲.
- [۱۲] Nagae, D., et al., *Development and operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۲۱. ۹۸۶: p. ۱۶۴۷۱۳.
- [۱۳] Sugisawa, Y., et al., *Installation of TOF-E telescope ERDA in UTTAC at the University of Tsukuba: Analysis of metal-nitride-based multi-layer coatings on glasses*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۲۰۲۱. ۵۰۳: p. ۶۸-۷۴.
- [۱۴] Boccaccio, P., et al., *On the detection efficiency of a microchannel plate detector in time-of-flight measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۱۹۸۶. ۲۴۳(۲/۳): p. ۵۹۹-۶۰۰.



ساخت نانودزیمتر $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ و بررسی پارامترهای سینتیک ترمولومینسانس آن به روشهای

دمای توقف و برزش منحنی درخشش (کد مقاله : ۱۱۲۹)

احسان صادقی*^{۱،۲} - مصطفی زاهدی فر^{۱،۲} - زهرا صباحی^۱

۱- دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

۲- دانشگاه کاشان، پژوهشکده علوم و فناوری نانو

چکیده:

در این تحقیق نانوذرات لانتانیوم فلوراید آلاینده شده با مس به روش هم‌رسوبی ساخته شد. ساختار کریستالی نمونه ساخته شده توسط آنالیز الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات حاصل تحت پرتودهی گاما با دزهای ۱۰ تا 1×10^4 گری قرار گرفته و توسط دستگاه TLD Reader قرائت شدند. علاوه بر این منحنی تابش ترمولومینسانس این ذرات که با پرتوهای گاما از منبع ^{60}Co پرتودهی شده‌اند با برنامه محاسباتی برازش شده و پارامترهای گیراندازی آن به طور عددی محاسبه شدند. با توجه به روش دمای توقف (Tm-Tstop) این منحنی از دو قله تشکیل شده است که روش برازش منحنی با استفاده از مدل مرتبه عام نیز آن را تأیید کرد. همچنین در این پژوهش تأثیر غلظت‌های مختلف ناخالصی روی خاصیت ترمولومینسانس نانوذرات ساخته شده بررسی شد و مقدار بهینه به دست آمد. پاسخ ترمولومینسانس تا 10 kGy هم خطی است که این نشان‌دهنده کارایی بسیار مناسب دزیمتر ساخته شده به خصوص برای سطح دز بسیار بالا می باشد. **کلمات کلیدی:** پارامترهای سینتیک، نانوذرات، هم‌رسوبی، دزیمتری، لانتانیوم فلوراید.

Fabrication of $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ Nanodosimeter and Investigation of Its Thermoluminescence Kinetic Parameters by Stopping Temperature and Glow Curve Fitting Methods

Ehsan Sadeghi*^{۱،۲}, Mostafa Zahedifar^{۱،۲}, Zahra Sabahi^۱

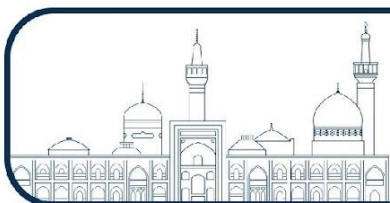
^۱-University of Kashan, Faculty of Physics, Nuclear Physics Department

^۲-University of Kashan, Institute of Nanoscience and Nanotechnology

Abstract:

In this study, copper-doped lanthanum fluoride nanoparticles were fabricated by co-precipitation method. The crystal structure of the fabricated sample was investigated by X-ray diffraction (XRD) pattern analysis. The resulting nanoparticles were subjected to gamma irradiation with doses of 10 to $4 \times 10^4 \text{ Gy}$ and were read by TLD Reader. In addition, the thermoluminescence emission curve of these particles, which were irradiated with gamma rays from a ^{60}Co source, was fitted with a computational program and its trapping parameters were calculated numerically. According to the Tm-Tstop method, this curve consists of two peaks, which was also confirmed by the curve fitting method using a general order model. Also, in this study, the effect of different impurity concentrations on the thermoluminescence properties of the fabricated nanoparticles was investigated and the optimal value was obtained. The thermoluminescence response is linear up to $10,000 \text{ Gy}$, indicating very good performance of a dosimeter designed specifically for very high dose levels.

Keywords: Kinetic parameters, Nanoparticles, Co-precipitation, Lanthanum fluoride.



۱- مقدمه:

در سالهای اخیر نانوذرات توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند به طوری که ساخت نانو ذرات و بررسی خواص منحصر به فرد آنها مورد پژوهش بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که نانوذرات خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به همتایان بالک خود دارند. از این رو مطالعات فراوانی در زمینه ویژگی‌های متفاوت نانوذرات و روش‌های ساخت آنها انجام شده است [۱-۶].

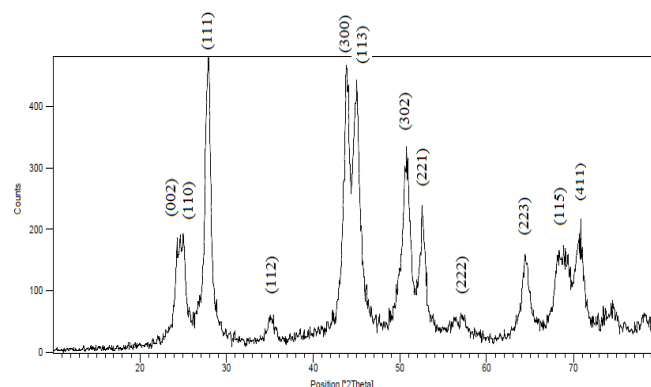
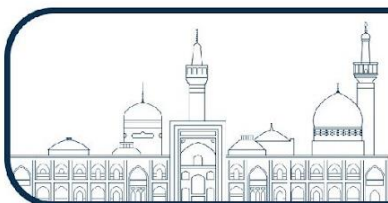
بلور معدنی لانتانیوم فلوراید به دلیل ویژگی‌های لومینسانس عالی آن، برای آشکارسازی تابش گاما تجاری‌سازی شده است [۷]. ساخت نانوذرات LaF_3 برای اولین بار توسط دانگ^{۲۵} و همکارانش گزارش شده است [۸]. وژل^{۳۶} و همکارانش این نانوذرات را سنتز کرده و به بررسی تعدیل سطح همراه با ویژگی‌های لومینسانس نانوذرات LaF_3 آلاینده شده با یون‌های خاکی کمیاب پرداختند [۸]. مطالعات انجام شده روی نانوذرات لانتانیوم فلوراید آلاینده شده با یون‌های خاکی کمیاب نشان دهنده شدت لومینسانس قوی و بازده لومینسانس بالای این نانوذرات است [۹-۱۱]. همچنین گزارش شده است که اندازه نانو بلورها و محل قرارگیری فلزات خاکی کمیاب در شبکه نانوبلور، بر شدت و بازده لومینسانس آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۱۲]. در این پژوهش نانو ذرات LaF_3 آلاینده شده با Cu به روش هم‌رسوبی ساخته شده است و پارمترهای سینتیک مربوط به منحنی درخشش ترمولومینسانس آن بررسی شده‌اند. بهینه درصد ناخالصی به همراه جزییات روش ساخت نیز آورده شده است.

۲- روش کار:

ابتدا ۰/۵ گرم $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ در مخلوطی از آب و اتانول روی استیر حل شد. سپس ۰/۵ گرم بریج ۳۵ به محلول آب و اتانول اضافه شده و بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا بریج کاملاً حل شود. بعد از حل شدن، بریج، به صورت قطره قطره به محلول لانتانیوم نیترات در حالی که بر روی همزن مغناطیسی قرار داشت، اضافه شد. در ادامه مقادیر مختلفی از دیسپروسیم نیترات، تولیم نیترات و مس نیترات به ترتیب برای ساخت نانو ذرات $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ به آن اضافه شد. در نهایت آمونیوم فلوراید به آرامی به محلول نهایی افزوده شد و برای مدتی روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. واکنش انجام شده و رسوب سفید رنگ شکل گرفت. پس از جداسازی رسوب از حلال به وسیله سانتریفیوژ، رسوب چندین بار با اتانول شستشو داده شد. به منظور به‌دست آوردن نمونه پودری، رسوب شسته شده در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد در آون به مدت ۲ ساعت درون آون خشک گردید. محصول به‌دست آمده نانو ذرات لانتانیوم فلوراید می‌باشد. پس از آن رسوب به مدت ۱ ساعت در دمای 150°C به منظور تبخیر بریج باقی‌مانده حرارت دهی شد.

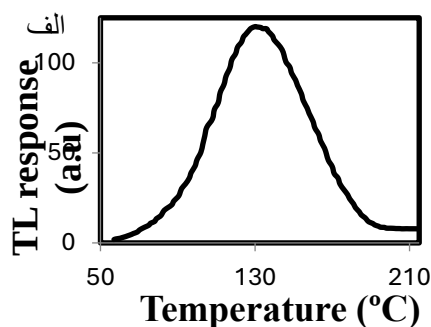
۳- نتایج:

به منظور بررسی ساختار بلوی دزیمتر ساخته شده از آنالیز SRD استفاده شد. نتیجه این آنالیز در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد الگوی به‌دست آمده تشکیل ساختار بلوری هگزاگونال لانتانیوم فلوراید را به خوبی تایید می‌کند که با شماره کارت مرجع ۰۵۱۰-۷۶۷۷ کاملاً هم‌خوانی دارد.

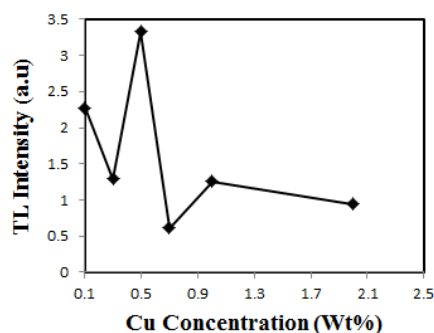


شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات لانتانیم فلوراید با ناخالصی مس.

برای آشکارسازی و ثبت منحنی‌های ترمولومینسانس از یک دستگاه آشکارسازی Harshaw مدل ۴۵۰۰ استفاده شد. قرائت با آهنگ دمایی ۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه انجام گرفت. نمونه‌ها پس از اعمال رژیم حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه و پرتودهی با ۱۰۰۰ گری دز گاما به دستگاه قرائتگر منتقل شدند. شکل ۲ الف نتیجه بدست آمده از قرائت دزیترمتر اخته شده را نشان می‌دهد.



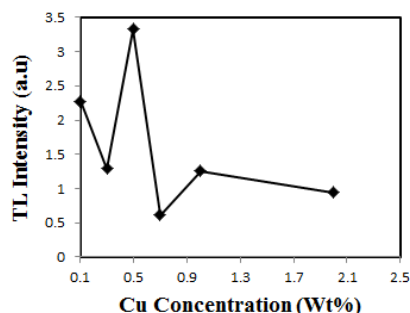
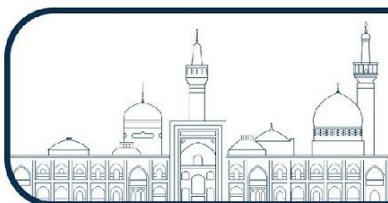
ب



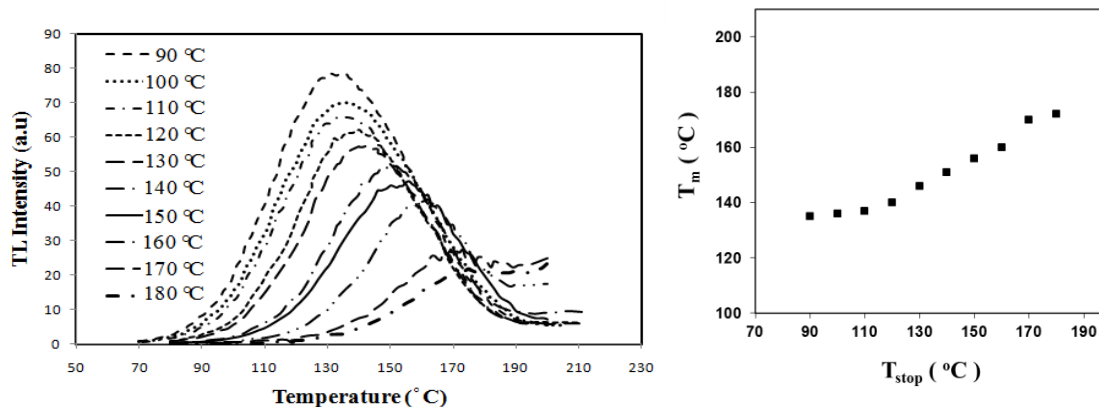
شکل (۲): الف- منحنی تابش ترمولومینسانس نانوذرات $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ پرتودهی شده با ۱۰۰۰ Gy دز گاما. ب- نمودار تأثیر

میزان ناخالصی مس بر نانوذرات لانتانیم فلوراید در برابر پرتو گاما.

نانو ذرات لانتانیم فلوراید با مقادیر مختلف ناخالصی مس (۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ۵/۰، ۷/۰، ۱، ۲ و ۵ مول درصد) ساخته شده و تابش ترمولومینسانس برای هر کدام قرائت شد سپس نمودار سطح زیر منحنی تابش ترمولومینسانس آن‌ها بر حسب درصد وزنی ناخالصی رسم شد (شکل ۲ ب). با توجه به شکل و مقادیر مختلف برای یون Cu می‌توان دریافت که میزان ۰/۵ مول درصد بهترین میزان ناخالصی برای افزایش حساسیت در نمونه‌های ساخته شده می‌باشد. شکل ۳ اثر میزان ناخالصی Cu را در میزان حساسیت ذرات به پرتوهای گاما نشان می‌دهد. برای تخمین تعداد قله‌های واقع در زیر سطح منحنی ترمولومینسانس نانوذرات $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ روش T_m-T_{stop} به کار گرفته شد. برای این کار ابتدا نمونه پرتودهی شده (۱ KGy با پرتوهای گاما چشمه ^{60}Co) را تا یک دمای توقف (T_{stop}) مشخص ۹۰°C تا ۱۸۰°C با تندی دمای ۲°C/S گرم کرده و سپس بلافاصله نمونه تا دمای اتاق سرد شد. این کار در بازه بیان شده تکرار شده و منحنی ترمولومینسانس هر یک از آن‌ها ثبت شده است. نتایج بدست آمده برای نانوذرات $\text{LaF}_3:\text{Cu}$ در شکل ۴ مشاهده می‌شوند.



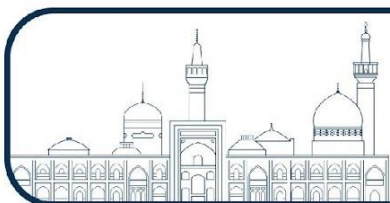
شکل (۳): نمودار تاثیر میزان ناخالصی مس بر پاسخ ترمولومینسانس نانوذرات لانتانیوم فلراید.



شکل (۴): نمودار T_m - T_{stop} منحنی ترمولومینسانس نانوذرات LaFr:Cu. نمودار نقطه ای، دمای بیشینه قله بر حسب مای توقف را نشان می دهد.

مشاهده می شود با افزایش مای توقف، دمای بیشینه قله منحنی درخشش ترمولومینسانس تا حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد به آرامی افزایش می یابد و سپس یک پرش در بیشینه قله ایجاد شده است. این می تواند به تخلیه کامل گیرنداز الکترون اول و شروع تخلیه تراز گیرنداز الکترون دوم با افزایش دمای توقف ربط داده شود. بنابراین این می توان حدس زد حداقل ۲ قله بسیار همپوش در زیر منحنی درخشش ترمولومینسانس لانتانیوم فلوراید با ناخالصی مس قرار دارد.

برای توصیف قله‌های ترمولومینسانس مربوط به نانو ذرات LaFr:Cu، منحنی درخشش ترمولومینسانس آنها برازش شد. با جداسازی منحنی درخشش ترمولومینسانس نانوذرات LaFr:Cu پارامترهای گیرندازی مربوط به آنها بدست آمد که در جدول ۱ آورده شده است. در واقع، میزان انطباق بین قله‌های تجربی و نظری را می توان با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که بر اساس الگوریتم Marquart-Levenberg طراحی شده، به دست آورد. این برنامه به روش تکرار عمل می کند و از پارامترهای هندسی قله‌های ترمولومینسانس تجربی مانند شدت بیشینه (I_m) و دمای بیشینه (T_m) استفاده کرده و با انطباق



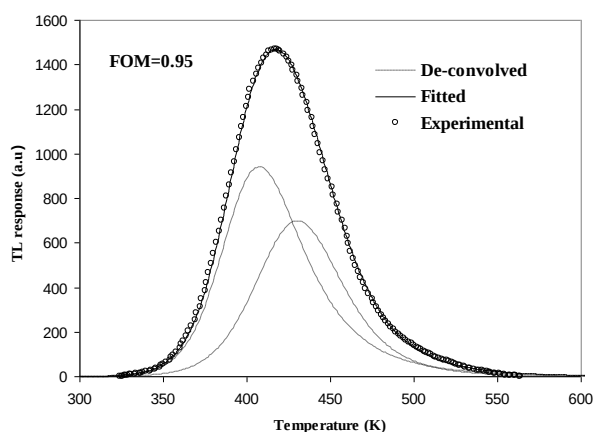
آن‌ها با نتایج نظری، منحنی تجربی را برازش می‌دهد. در این تحقیق، از مدل سینتیکی مرتبه‌عام برای تعیین پارامترهای سینتیکی استفاده شد که معادله آن به صورت تابعی از شدت بیشینه و دمای بیشینه به شرح زیر می‌باشد [۱۳]:

$$I(T) = I_m b^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) \times \left\{ \frac{T^2}{T_m^2} (b-1) \left(1 - \frac{2kT}{E}\right) \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) + 1 + (b-1) \frac{2kT_m}{E} \right\}^{-\frac{b}{b-1}} \quad (1)$$

که در آن b پارامتر سینتیک بین ۱ و ۲ است، E انرژی فعالساز، T دما بر حسب کلون، T_m دمای بیشینه و k ثابت بولتزمن می‌باشد. برای تعیین میزان انطباق منحنی ترمولومینسانس تئوری و تجربی از رابطه FOM به صورت زیر استفاده شد [۱۴]:

$$FOM = \frac{\sum |y_i - f_i|}{\sum y_i} \times 100 \quad (2)$$

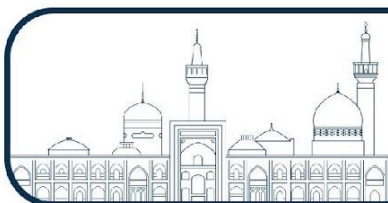
در این معادله y_i به مقادیر واقعی یا داده‌های تجربی اشاره دارد و f_i بهترین مقداری است که از طریق فرآیند تطبیق به دست می‌آید [۱۴]. مقدار FOM محاسبه‌شده برابر با ۰/۹۵ است که نشان‌دهنده تطابق خوب میان داده‌های تجربی و منحنی نظری است. نتایج نشان می‌دهند که منحنی درخشش دزیمتر تولید شده از دو قله در دماهای ۳۹۹ و ۴۱۸ کلون تشکیل شده است. شکل ۴ نتیجه برازش و همچنین جدول ۱ نتایج مربوط به برازش انجام شده را نشان می‌دهند. پارامتر سینتیک b بری قله اول نزدیک به ۲ بدست آمده است و با شیب حرکت دکی بیشین قل در نمودار قبل همخوانی دارد.



شکل (۵): منحنی درخشش ترمولومینسانس برازش شده نانوذرات $\text{LaF}_3:\text{Cu}$.

جدول (۱): نتایج مربوط به پارامترهای سینتیک منحنی درخشش دزیمتر روی فسفات با ناخالصی لانتانوم.

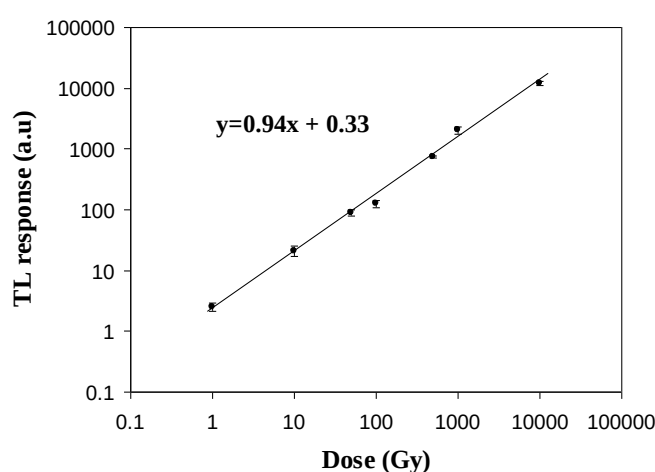
Peak	b	E(eV)	$T_m(\text{k})$	$I_m(\text{a.u})$



۱	۱/۶۸	۰/۹۲	۳۹۹	۷۱
۲	۱/۱۴	۰/۶۵	۴۱۸	۶۰

۴- پاسخ دز

در ادامه پاسخ نانوذرات ساخته شده به پرتوهای گاما با مقدار دز مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده با دزهای مختلف از بازه (۱۰-۱۰۰۰۰) گری پرتو دهی شدند. شکل ۶ منحنی تابش ترمولومینسانس نانوذرات LaFr:Cu را به ازای مقادیر مختلف دز گاما نشان می‌دهد.

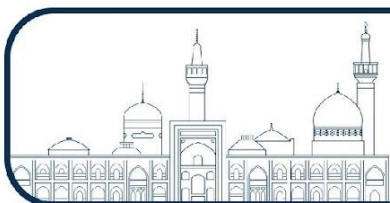


شکل (۶): پاسخ TL نانوذرات LaFr:Cu با تغییر دز (توجه شود که هر دو محور لگاریتمی می‌باشد).

از روی منحنی تابش ترمولومینسانس پیدا است که با افزایش دز، شدت پاسخ ترمولومینسانس بیشتر می‌شود. همان‌طور که از روی نمودار پاسخ نیز واضح است، نانوذرات ساخته شده در بازه (۱-۱۰۰۰۰) گری رفتار خطی دارند. همچنین تکرارپذیری استفاده از دزیتر ساخته شده در ۱۰ مرحله پی در پی از گرمادهی، پرتو دهی و قرائت بررسی شد که نتایج نشان دهنده تکرارپذیری پاسخ ترمولومینسانس نمونه ساخته شده بود.

۵- بحث و نتیجه گیری:

لاتانیوم فلورید با ناخالصی مس ساخته شد و با ساختارشناسی موفق آن با استفاده از آنالیز XRD، روش به کار برده شده مورد تأیید قرار گرفت. درصد بهینه ناخالصی مس برای دستیابی به بالاترین پاسخ ترمولومینسانس در ۰/۵ مول درصد تعیین شد. منحنی درخشش ترمولومینسانس نمونه پس از پرتو دهی گاما ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به روش دمای توق ($T_m - T_{stop}$) این منحنی از دو قله تشکیل شده است که روش برازش منحنی با استفاده از مدل مرتبه عام نیز آن را تأیید کرد. مقدار بسیار مناسب FOM (۰/۹۵) صحت برازش انجام شده را تأیید می‌کند که در نتیجه آن دو قله در دماهای ۳۹۹ و ۴۱۸ کلوین منحنی درخشش ترمولومینسانس نمونه ساخته را شکل می‌دهند. پاسخ ترمولومینسانس تا ۱۰۰۰۰ گری هم خطی است که این نشان دهنده کارایی بسیار مناسب دزیتر ساخته شده بخصوص برای سطح دز بسیار بالا می‌باشد.

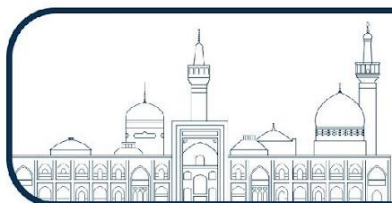


۶- مراجع:

- [۱] Salah, N., Khan, Z. H., & Habib, S. S. (۲۰۱۱). Nanoparticles of Al_2O_3 : Cr as a sensitive thermoluminescent material for high exposures of gamma rays irradiations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۲۶۹(۴), ۴۰۱-۴۰۴.
- [۲] Shoushtari, M. K., Zahedifar, M., & Sadeghi, E. (۲۰۱۸). Preparation and thermoluminescent dosimetry features of high sensitivity LiF:Mg, Ce phosphor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۸۸۷, ۱۲۸-۱۳۲.
- [۳] ALIVISATOS A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots [J]. Science, ۱۹۹۶, ۷۱(۵۲۵۱): ۹۳۳-۹۳۷.
- [۴] SONG Y J, GARCIA R M, DORIN R M, WANG H R, QIU Y, COKER E N, STEEN W A, MILLER J E, SHELNUTT J A. Synthesis of platinum nanowire networks using a soft template [J]. Nano Letters, ۲۰۰۷, ۷(۱۲): ۳۶۵۰-۳۶۵۵.
- [۵] XIU Zhi-liang, LÜ Meng-kai, ZHOU Guang-jun, GU Feng, ZHANG Hai-ping, XU Dong, YUAN Duoong. A facile soft template synthesis and characterization of PbHAsO_4 nanocrystals [J]. Materials Research Bulletin, ۲۰۰۴, ۳۹(۱۳): ۲۰۱۹-۲۰۲۳.
- [۶] JIANG Jiu-xin, LIU Jie, LIU Chang, ZHANG Gao-wen, GONG Xing-hou, LIU Jia-ning. Roles of oleic acid during micropore dispersing preparation of nano-calcium carbonate particles [J]. Applied Surface Science, ۲۰۱۱, ۲۵۷(۱۶): ۷۰۴۷-۷۰۵۳.
- [۷] H.S. Nalwa, Hand book of nano structure materials and nano technology, ۱۶, ۳۳۴-۳۳۵ (۲۰۰۵).
- [۸] B. D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Swcond ed. Addison-Wesley publ: shing Comany, p.۹۹ (۱۹۵۶).
- [۹] Kim, Jaewoo, et al. "Luminescence properties of LaF_3 : Ce nanoparticles encapsulated by oleic acid." Materials Research Bulletin ۵۷ (۲۰۱۴): ۱۱۰-۱۱۵.
- [۱۰] Phaomei, Ganngam, and W. Rameshwor Singh. "Effect of solvent on luminescence properties of re-dispersible LaF_3 : Ln³⁺ ($\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ and Tb^{3+}) nanoparticles." Journal of Rare Earths" ۳۱, ۴ (۲۰۱۳): ۳۴۷-۳۵۵.
- [۱۱] T. Zhan, H. Guo, Y.M. Qiao, Facile synthesis, structural and optical characterization of LnF_3 :Re nano-crystals by ionic liquid-based hydrothermal process, J. Lumin. ۱۲۹ (۲۰۰۹) ۸۶۱-۸۶۶.
- [۱۲] R.F. Qin, H.W. Song, G.H. Pan, et al., Polyol-mediated synthesis of hexagonal LaF_3 nano-plates using NaNO_3 as a mineralizer, Crystal Growth Des. ۹ (۲۰۰۹) ۱۷۵۰-۱۷۵۶.



- [۱۳] G. G. Kitis, J.M. Gomez Ros, J.W.N. Tuyn. Thermoluminescence glow curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics, J. Phys. D: Appl. Phys. ۳۱(۱۹۹۸) ۲۶۳۶-۲۶۴۱.
- [۱۴] H. G. Balian, N. W. Eddy. Figure of merit (FOM), an improved criterion over the normalized chisquared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectra peaks. Nucl. Instr. Meth. ۱۴۵ (۱۹۷۷) ۳۸۹-۳۹۳.



بهبود شناسایی رادیوایزوتوپ با تحلیل طیف بتا (کد مقاله : ۱۱۳۶)

صادقی زالی، وحید^۱ - اشرفی، صالح^۲ - قلع‌ه‌اسدی، آیدین^۲ - علیزاده، داود^۱ - امیری، نرجس

^۱ - دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک

^۲ - دانشگاه تبریز، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی

چکیده:

شناسایی رادیوایزوتوپ‌ها به طور معمول با تحلیل طیف گامای آنها توسط آشکارسازهای سوسوزن انجام می‌شود. با رویکردی نوآورانه، از اطلاعات موجود در طیف بتا، روشی دقیق‌تر برای شناسایی و تفکیک انواع مختلف مواد رادیواکتیو ارائه شده است. تحلیل همزمان دو طیف، افزایش دقت محسوسی در شناسایی رادیوایزوتوپ حاصل می‌نماید. این مساله خصوصاً در مواردی که طیف گامای دو رادیوایزوتوپ مشابه هستند، کمک قابل ملاحظه‌ای در شناسایی و تعیین سهم رادیوایزوتوپ‌ها در طیف خواهد نمود.

کلمات کلیدی: طیف گاما، آشکارسازهای سوسوزن، طیف بتا، شناسایی رادیوایزوتوپ، تحلیل همزمان

Improving radioisotope identification by beta spectrum analysis

Sadeghi Zali, Vahid^{۱*}; Ashrafi, Saleh^{۱,۲}; Ghaleasadi,

Aydin^۲; Alizadeh, Davood^۱; Amiri, Narjes^۱

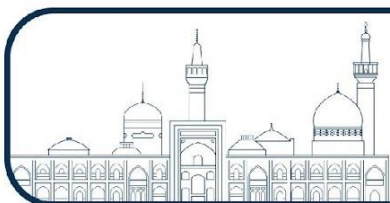
^۱-University of Tabriz, Tabriz, Physics Faculty, Nuclear Physics Group

^۲-University of Tabriz, Institute of Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz

Abstract:

Radioisotope identification primarily relies on the analysis and deconvolution of gamma spectra measured using scintillation detectors. This study introduces a novel approach by incorporating beta spectra as supplementary information. Simultaneous analysis of both spectra significantly enhances the accuracy of radioisotope identification. This is particularly beneficial in cases where the gamma spectra of two radioisotopes are similar, aiding in their identification and quantifying their contributions to the overall spectrum.

Key words: gamma spectra, scintillation detectors, beta spectra, radioisotope identification, simultaneous analysis



۱- مقدمه:

آشکارسازی مواد رادیواکتیو و شناسایی رادیوایزوتوپ از جمله مسائل مهم در موضوع ایمنی و امنیت هسته‌ای می‌باشد [۱]. کنترل ورود و خروج این مواد در مرزهای زمینی، هوایی و دریایی توسط پایشگرهای دروازه‌ای تابش هسته‌ای^{۳۷} انجام می‌گیرد. از طرفی شناسایی رادیوایزوتوپ در پایش حوادث و سوانح هسته‌ای نقش اساسی دارد [۲]. استفاده از آشکارسازهای هسته‌ای با قدرت تفکیک انرژی بالا از جمله آشکارسازهای نیم‌رسانا با مشکلاتی همانند نیاز به سرمایش تا دماهای پایین مواجه می‌باشد، که این مساله کاربرد آنها در محیط اندازه‌گیری را محدود می‌کند [۳]. از جمله آشکارسازهای قابل حمل با کاربری آسان، بازده آشکارسازی بالا و قیمت پایین آشکارسازهای سوسوزن می‌باشند که پاسخ سریعی به تابش‌های هسته‌ای دارند. از این‌رو، این آشکارسازها بطور عمده در تجهیزات پایش مواد پرتوزا و شناسایی رادیوایزوتوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدلیل قدرت پایین تفکیک انرژی این آشکارسازها، استفاده از الگوریتم‌های واپیچش طیف اندازه‌گیری شده بمنظور جداسازی سهم رادیوایزوتوپ‌های موجود در طیف‌های تجربی، ضروری است [۴]. همچنین، شناسایی رادیوایزوتوپ‌ها از طیف اندازه‌گیری شده گاما یکی از موضوعات مورد علاقه در پژوهش‌های اخیر بوده است [۵]. روش تشخیص رادیوایزوتوپ مبتنی بر برازش طیف گامای اندازه‌گیری شده بر مجموعه‌ای از طیف‌های نمونه می‌باشد تا سهم هر کدام از رادیوایزوتوپ‌ها در ترکیب اندازه‌گیری شده مشخص گردد. روش‌های مختلفی برای شناسایی رادیوایزوتوپ ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به الگوریتم گلد^{۳۸} [۶]، الگوریتم ژنتیک [۷]، روش ترکیبی چندگامی [۸] و ... اشاره کرد که دقت نسبتاً خوبی در تشخیص رادیوایزوتوپ‌ها دارند. ولی با توجه به قدرت تفکیک انرژی پایین آشکارساز NaI(Tl) و همچنین گزارش تشخیص اشتباه رادیوایزوتوپ در بعضی موارد توسط این روش‌ها، همواره وجود روشی با دقت و کارایی بالاتر ضروری است.

در این مطالعه، از آنالیز طیف بتا و گاما اندازه‌گیری شده با دو آشکارساز سوسوزن پلاستیک و یدورسیدیم برای بهبود دقت شناسایی رادیوایزوتوپ‌های موجود در چشمه مرکب استفاده شده و نتایج حاصل از آن با نتایج روش‌های پیشین مقایسه خواهد شد.

۲- روش کار:

هدف روش‌های شناسایی رادیوایزوتوپ، آنالیز طیف انرژی پرتوهای ساطع شده از چشمه مرکب از چندین رادیوایزوتوپ پرتوزا جهت تشخیص هر یک از رادیوایزوتوپ‌ها و تعیین سهم هر کدام می‌باشد. بدین منظور، طیف اندازه‌گیری شده ترکیبی خطی از طیف‌های تعدادی از عناصر شناخته شده در نظر گرفته می‌شود که ضرایب خطی نشانگر حضور یا عدم حضور و فراوانی هر عنصر در طیف می‌باشند. بدین منظور باید کتابخانه‌ای از داده‌های طیف‌های تجربی تعداد L رادیوایزوتوپ شناخته شده موجود باشند. رابطه خطی برای این مدل به صورت زیر است:

$$S = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_L T_L \quad (1)$$

که S طیف اندازه‌گیری شده و T_L طیف رادیوایزوتوپ L ام و ضریب خطی α_L سهم رادیوایزوتوپ L ام در طیف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هر کدام از طیف‌های S و T در معادله (۱) برداری ستونی هستند که داریه‌های آنها متناظر با اعداد ثبت شده در کانال‌های آشکارساز هستند.

الگوریتم گلد برای حل معادله (۱) از رابطه تکراری به فرم زیر استفاده می‌کند [۵]:

^{۳۷} Radiation Portal Monitor

^{۳۸} Gold Algorithm



$$\alpha_i^{n+1} = \alpha_i^n \frac{S'_i}{\sum_{j=1}^{1024} A_{i,j} \alpha_j^n}, \quad i = 1, 2, \dots, L$$

که n شماره

(۲)

تکرار و $A = R^T R$ و $S' = R^T S$ می‌باشد [۶].

الگوریتم ژنتیک بجای حل معادله (۱) بصورت مستقیم تابع معادل آن را کمینه‌سازی می‌کند که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$f = \sum_{j=1}^{1024} \frac{\left(\sum_{i=1}^L \alpha_i T_{i,j} - S_j \right)^2}{\sum_{i=1}^L \alpha_i T_{i,j} + S_j}$$

(۳)

که عدد ۱۰۲۴ برای تعداد کانال‌های تحلیلگر چند کاناله آشکارساز سوسوزن مورد مطالعه انتخاب شده است.

۲-۱- روش چندگامی

روش چندگامی که برای واپیچش طیف مرکب معرفی شده با بهره‌گیری از توانایی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری اقدام به واپیچش طیف پیچیده در سه گام می‌کند [۸]. در این مطالعه با تعمیم گام‌های روش چندگامی از آن برای حل معادله (۱) و تشخیص رادیوایزوتوپ استفاده خواهد شد. گام‌های روش چندگامی بصورت زیر تعمیم داده می‌شود:

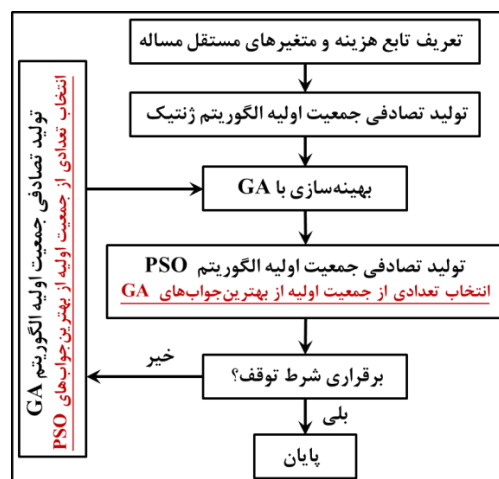
گام (۱) کمینه کردن تابع خطا. در این مرحله یک تابع خطا به فرم زیر بایستی کمینه شود

$$EF = \sum_{j=1}^{1024} \left| S_j - \sum_{i=1}^L \alpha_i T_{i,j} \right|$$

با توجه

(۴)

به بدو وضع بودن این معادله و نیز جهت فرار از کمینه‌های محلی، دو الگوریتم ژنتیک^{۳۹} (GA) و ازدحام ذرات^{۴۰} (PSO) بصورت همزمان برای یافتن کمینه مطلق معادله (۴) بکار گرفته می‌شود که فلوچارت آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) فلوچارت روش چندگامی برای یافتن کمینه مطلق تابع خطا.

^{۳۹} Genetic Algorithm (GA)

^{۴۰} Particle Swarm Optimization (PSO)



گام ۲) انتخاب رادیویزوتوپ. پس از کمینه کردن تابع خطا و یافتن جواب اولیه از گام ۱، جوبلی به فرم $\alpha^T = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$ ارائه می‌شود که α^T ترانهاده α^{th} می‌باشد. به دلیل نویز این جواب ممکن است با کمی افت و خیز همراه شده باشد، از این رو مقدار عددی درایه‌هایی که مقدار آنها کمتر از ۰/۰۳ باشند برابر با صفر قرار داده می‌شوند. عدد ۰/۰۳ بصورت اختیاری در این مطالعه انتخاب شده و می‌توان با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون اکتیویته چشمه، زمان اندازه‌گیری، میزان نویز و افت و خیز آماری و ... آن را تغییر داد.

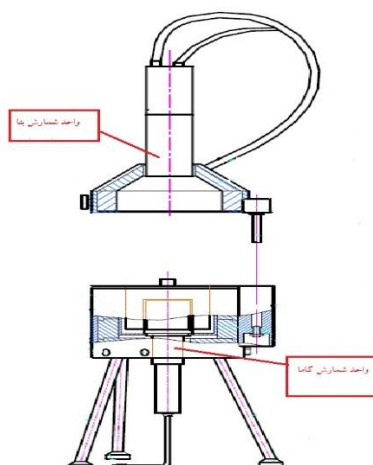
گام ۳ محاسبه شدت نسبی رادیویزوتوپ‌ها. شدت نسبی رادیویزوتوپ‌های تعیین شده در گام ۲ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RI_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^L \alpha_j}, \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (7)$$

واضح است که مجموع شدت‌های نسبی رادیویزوتوپ‌ها برابر ۱ خواهد بود به عبارت دیگر

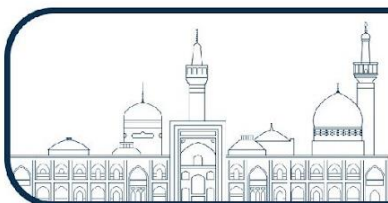
$$\sum_{i=1}^L RI_i = 1$$

در مطالعات قبلی جهت تعیین رادیویزوتوپ‌هایی همانند استرانسیم-۹۰ از بررسی طیف بتای آن به عنوان هسته گسیلنده بتا استفاده شده است [۹]. از طرفی، گسیل گاما، عمدتاً به عنوان یک واپاشی ثانویه پس از مدهای واپاشی دیگر همچون گسیل ذرات بتا رخ می‌دهد [۱۰]. بنابراین در این مطالعه، تاثیر حضور طیف بتا به عنوان یک اطلاعات تکمیلی از تابش ماده رادیواکتیو در افزایش دقت فرآیند شناسایی رادیویزوتوپ مورد بررسی قرار گرفت. برای سنجش دقت و کارایی این روش در شناسایی ایزوتوپ از چندین طیف مرکب شبیه‌سازی شده در کد MCNP استفاده شده است. دستگاه شبیه‌سازی شده، دستگاه Atomtex AT۱۳۱۵، شامل دو آشکارساز یدورسیدیم (برای اندازه‌گیری طیف گاما) و آشکارساز پلاستیک (برای اندازه‌گیری طیف بتا) می‌باشد (مطابق شکل ۲). آشکارساز Atomtex AT۱۳۱۵ به دلیل محدودیت رزولوشن آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک و NaI(Tl)، برای آنالیز تعداد محدودی از رادیویزوتوپ‌ها قابل استفاده می‌باشد. برای تحلیل دقیق نیاز به استفاده از آشکارسازهای نیمه‌هادی گاما (HPGe) و بتا (Si-PIN Photodiode) می‌باشد. با این حال، نظر به مشکلاتی همچون قیمت بالا و عدم قابلیت استفاده پرتابل از این آشکارسازها، سعی شده است به کمک ابتکار استفاده از دو آشکارساز و به لطف الگوریتم‌های نوین، نتایج آشکارسازهای سوسوزن را به نتایج آشکارسازهای نیمه‌هادی نزدیک کرد.



شکل (۲) طرحواره دستگاه Atomtex AT۱۳۱۵

A^T is transpose of A^{th}



صحت شبیه‌سازی انجام گرفته قبلاً در مطالعه دیگری مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۱]. به‌منظور بررسی تاثیر در نظر گرفتن طیف بتای گسیلی از هسته در افزایش دقت شناسایی رادیوایزوتوپ، دو هسته سزیوم-۱۳۴ و سزیوم-۱۳۷ که دارای قله‌های انرژی طیف گاما نزدیک به هم می‌باشند، در نظر گرفته شد. چرا که پهن شدگی گاوسی طیف انرژی گامای اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز سوسوزن یدورسدیم این دو هسته سبب همپوشانی و پایین آمدن دقت شناسایی رادیوایزوتوپ می‌شود. از طرفی دیگر، افتراق این دو رادیوایزوتوپ و نسبت آنها در خاک بعنوان شاخصی برای تشخیص منشأ آلودگی‌های رادیواکتیو ناشی از رآکتورها می‌باشد [۱۲]. لازم به ذکر است، طیف اندازه‌گیری شده در دستگاه فوق‌الذکر، طیف غیرهمفرودی می‌باشد.

۳- نتایج:

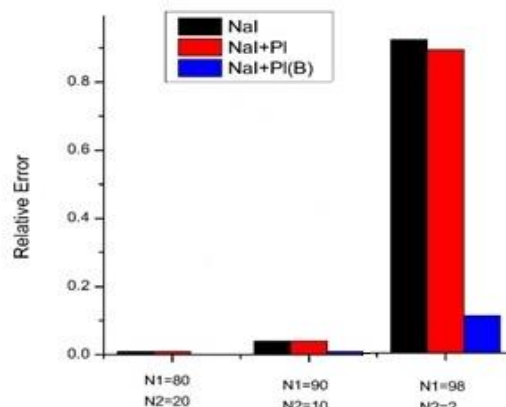
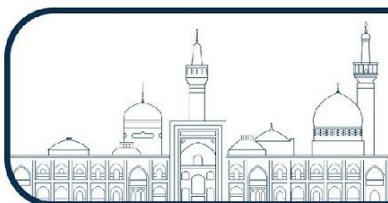
در این مطالعه، طیف بتا و گامای هسته‌های سزیوم-۱۳۷ و سزیوم-۱۳۴ اندازه‌گیری شده توسط دو آشکارساز سوسوزن پلاستیک و یدورسدیم توسط دو الگوریتم گلد و ترکیبی چندگامی تحلیل شده‌است. آشکارساز پلاستیک می‌تواند طیف گاما را در اثر اندرکنش کامپتون نیز نمایان سازد. از این‌رو، طیف این آشکارساز در دو حالت در نظر گرفتن طیف بتا و بدون طیف بتا لحاظ شده‌است. نتایج حاصل برای نسبت‌های مختلف از این دو هسته در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

که در جدول ۱، N_1 سهم هسته سزیوم-۱۳۷، N_2 سهم هسته سزیوم-۱۳۴، CP سهم تخمین‌زده‌شده توسط الگوریتم برای هسته اول، PE درصد خطای نسبی پیش‌بینی، NaI داده‌های آشکارساز یدورسدیم، PI داده‌های آشکارساز پلاستیک بدون در نظر گرفتن سهم تابش بتا و PI(B) داده‌های آشکارساز پلاستیک با در نظر گرفتن سهم تابش بتا می‌باشد. منظور از سهم نسبی ذکر شده، همان نسبت اکتیویته‌های در نظر گرفته شده و محاسبه شده برای دو هسته می‌باشد.

مطابق با نتایج جدول ۱، اضافه کردن داده‌های آشکارساز پلاستیک بدون در نظر گرفتن سهم تابش بتا، تاثیری در دقت شناسایی رادیوایزوتوپ ندارد. علت این مساله قدرت تفکیک پایین آشکارساز پلاستیک برای طیف گاما نسبت آشکارساز سوسوزن یدورسدیم می‌باشد. از طرفی دیگر، اضافه کردن داده‌های آشکارساز سوسوزن پلاستیک با در نظر گرفتن تابش بتای ماده رادیواکتیو به داده‌های آشکارساز سوسوزن یدورسدیم باعث بهبود در نتایج پیش‌بینی الگوریتم‌های مختلف با کاهش خطای نسبی تخمین سهم هسته رادیواکتیو سزیوم-۱۳۷ می‌شود. شکل ۳، داده‌های مربوط به استفاده از روش چندگامی با ترکیب الگوریتم‌های PSO-GA جدول ۱ را به صورت گرافیکی برای درک بهتر میزان بهبود خطا در شناسایی رادیوایزوتوپ با اضافه کردن طیف بتای آشکارساز پلاستیک نشان می‌دهد.

جدول ۱: نتایج الگوریتم‌های مختلف در شناسایی رادیوایزوتوپ با در نظر گرفتن بتا و تاثیر استفاده از دو آشکارساز

Gold		PSO-GA		آشکارساز	نسبت هسته‌ها
CP	PE	CP	PE		
24/-	+2-	3+ +,	+ +,	NaI	N1=80 N2=20
24/+	+20	3+ +,	+ +,	NaI+PI	
24'1/	+ / 0	3+ ++	+	NaI+PI(B)	
4+ . ,	+ . /	34'41	+ + /	NaI	N1=90 N2=10
4+ -3	+ . ,	34'41	+ + /	NaI+PI	
4+ , ,	+ , -	4+ +,	+ +,	NaI+PI(B)	
41' 0	, '34	42 , +	+4-	NaI	N1=98 N2=2
41'-2	, '22	42 , .	+ '34	NaI+PI	
42/ 0	+ '01	42 34	+ , ,	NaI+PI(B)	



شکل (۳) نمودار خطای نسبی مربوط به استفاده از الگوریتم چندگامی با ترکیب PSO-GA برای هر دو آشکارساز سوسوزن با توجه به نمودار شکل (۳)، که برگرفته از داده‌های جدول ۱ است، به وضوح تاثیر طیف بتا در افزایش دقت شناسایی رادیوایزوتوپ مشاهده می‌گردد.

۴- بحث و نتیجه گیری:

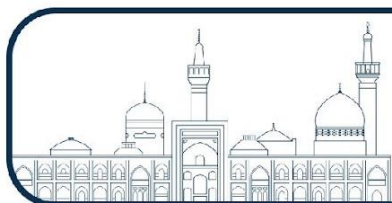
در این مقاله، تاثیر در نظر گرفتن طیف بتای هسته رادیواکتیو در افزایش دقت شناسایی رادیوایزوتوپ توسط آشکارسازهای سوسوزن مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی این روش، طیف بتا و گامای اندازه‌گیری شده توسط دو آشکارساز سوسوزن پلاستیک و یدورسیدیم هسته‌های سزیم-۱۳۷ و سزیم-۱۳۴ که دارای قله انرژی گامای نزدیک به هم هستند، در نظر گرفته شد. با توجه به قدرت تفکیک پایین آشکارسازهای سوسوزن نسبت به آشکارسازهای نیمه‌هادی، در چنین مواردی، واپیچش طیف گامای این دوهسته با مشکل همپوشانی مواجه می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های نوین مانند ژنتیک کمک شایانی به تفکیک بهتر این رادیوایزوتوپ‌ها می‌نماید. با این حال، در این مطالعه از داده‌های مربوط به آشکارساز پلاستیک علاوه بر آشکارساز یدورسیدیم استفاده شد. داده‌های بدست آمده نشان داد که طیف آشکارساز سوسوزن پلاستیک بدون در نظر گرفتن طیف بتای گسیلی توسط این دو رادیوایزوتوپ تاثیر چندانی در بهبود دقت به هنگام استفاده از الگوریتم‌های گلد و چند گامی نداشت. اضافه کردن داده‌های طیف بتای اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز سوسوزن پلاستیک، منجر به بهبود قابل توجهی در پیش‌بینی سهم رادیوایزوتوپ‌ها نسبت به حالتی که صرفاً طیف گاما در نظر گرفته می‌شد، داشت. همچنین، نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم چندگامی منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به الگوریتم گلد می‌گردد.

۵- مراجع:

- [۱] L. El-Guebaly, "Managing Fusion Radioactive Materials: Approaches and Challenges Facing Fusion in the ۲۱st Century," Fusion Science and Technology, vol. ۷۹, no. ۸, pp. ۹۱۹–۹۳۱, Nov. ۲۰۲۳, doi: ۱۰.۱۰۸۰/۱۵۳۶۱۰۵۵.۲۰۲۲.۲۱۵۱۸۲۰.
- [۲] M. A. Goodwin et al., "Radionuclide measurements of the international monitoring system," J Environ Radioact, vol. ۲۷۲, p. ۱۰۷۳۵۷, Feb. ۲۰۲۴, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jenvrad.۲۰۲۳.۱۰۷۳۵۷.
- [۳] B. D. Milbrath, A. J. Peurrung, M. Bliss, and W. J. Weber, "Radiation detector materials: An overview," J Mater Res, vol. ۲۳, no. ۱۰, pp. ۲۵۶۱–۲۵۸۱, Oct. ۲۰۰۸, doi: ۱۰.۱۵۵۷/JMR.۲۰۰۸.۰۳۱۹.
- [۴] K. A. Pradeep Kumar, G. A. Shanmugha Sundaram, and R. Thiruvengadathan, "Advances in detection algorithms for radiation monitoring," J Environ Radioact, vol. ۲۱۷, p. ۱۰۶۲۱۶, Jun. ۲۰۲۰, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jenvrad.۲۰۲۰.۱۰۶۲۱۶.



- [۵] S. Qi et al., "Comparison of machine learning approaches for radioisotope identification using NaI(Tl) gamma-ray spectrum," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. ۱۸۶, p. ۱۱۰۲۱۲, Aug. ۲۰۲۲, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.apradiso.۲۰۲۲.۱۱۰۲۱۲.
- [۶] P. Bandžuch, M. Morháč, and J. Krištiak, "Study of the Van Cittert and Gold iterative methods of deconvolution and their application in the deconvolution of experimental spectra of positron annihilation," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. ۳۸۴, no. ۲-۳, pp. ۵۰۶-۵۱۵, ۱۹۹۷, doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۱۶۸-۹۰۰۲(۹۶)۰۰۸۷۴-۱.
- [۷] C. M. Carlevaro, M. V. Wilkinson, and L. A. Barrios, "A genetic algorithm approach to routine gamma spectra analysis," *Journal of Instrumentation*, vol. ۳, no. ۱, p. ۱۰۰۱, ۲۰۰۸, doi: ۱۰.۱۰۸۸/۱۷۴۸-۰۲۲۱/۳/۰۱/P۰۱۰۰۱.
- [۸] D. Alizadeh and S. Ashrafi, "New hybrid metaheuristic algorithm for scintillator gamma ray spectrum analysis," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. ۹۱۵, pp. ۱-۹, ۲۰۱۹, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.nima.۲۰۱۸.۱۰.۱۷۸.
- [۹] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, ۲۰۱۰.
- [۱۰] A. Ghalehasadi, S. Ashrafi, D. Alizadeh, and N. Meriç, "Gamma ray interactions based optimization algorithm: Application in radioisotope identification," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. ۵۳, no. ۱۱, pp. ۳۷۷۲-۳۷۸۳, Nov. ۲۰۲۱, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.NET.۲۰۲۱.۰۵.۰۱۸.
- [۱۱] A. Maekawa, N. Momoshima, S. Sugihara, R. Ohzawa, and A. Nakama, "Analysis of ^{134}Cs and ^{137}Cs distribution in soil of Fukushima prefecture and their specific adsorption on clay minerals," *J Radioanal Nucl Chem*, vol. ۳۰۳, no. ۲, pp. ۱۴۸۵-۱۴۸۹, Feb. ۲۰۱۵, doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۹۶۷-۰۱۴-۳۵۷۵-۲.



ساخت، ساختارشناسی و مطالعه خواص نوری باریوم فلوراید (کد مقاله: ۱۱۳۷)

شریفی، زهرا^۱ - هارونی، سمیه^۱ - صادقی، احسان^۲ - زاهدی فر، مصطفی

۱- دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

۲- دانشگاه کاشان، پژوهشکده علوم و فناوری نانو

چکیده:

نانوساختار باریوم فلوراید جزء سریع‌ترین مواد لومینسانسی و سوسوزن است اما یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن در دزیمتری است. به این منظور در این کار نانوساختار باریوم فلوراید با ناخالصی لانتانیم نیترات به روش هم رسوبی ساخته شد. مقدار ناخالصی آلاییده شده ۰/۳ مول درصد است. شکل و ساختار و عنصر شناسی نانوساختار با آنالیزهای SEM و XRD و EDS مشاهده شد. ساختار تشکیل شده به صورت نانو صفحات به هم فشرده با اندازه کمتر از ۱ میکرومتر بدست آمد. با محاسبه معادله دبی شرر نیز اندازه بلورها کمتر از ۵۰ نانومتر بدست آمد. هیچ عنصر اضافی در نانوساختار وجود نداشت. نانوساختار ساخته شده تحت پرتودهی با اشعه گاما ^{60}Co با میزان دز ۵۰۰ گری قرار گرفت. خواص ترمولومینسانس آن بررسی شد. با برازش منحنی ترمولومینسانس، تعداد قله‌های زیر سطح منحنی ترمولومینسانس و پارامترهای سینتیک مربوط به آن قله‌ها محاسبه شد. منحنی درخشش دارای دو قله در دماهای ۴۰۵ و ۶۰۵ درجه کلوین می‌باشد.

کلمات کلیدی: ترمولومینسانس، دزیمتر، لانتانیم، پرتودهی، اشعه گاما

Monte Carlo Study and Evaluation of shielding performance of Ilmenite-Containing Concretes

Sharifi, zahra^{۱*} - Haroni, Somaye^۱ - Sadeghi, Ehsan^{۱,۲} - Zahedifar, Mostafa^{۱,۲}

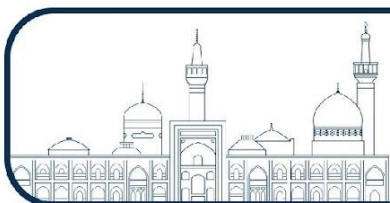
۱- University of Kashan, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics

۲- University of Kashan, Institute of Nanoscience and Nanotechnology

Abstract:

Barium fluoride nanostructure is one of the fastest luminescent and scintillating materials, but one of its most important applications is in dosimetry. For this purpose, in this work, a barium fluoride nanostructure with lanthanum nitrate impurity was synthesized by co-precipitation method. The amount of impurity doped is ۰,۳ mol%. The shape and structure and elementology of the nanostructure were observed by SEM, XRD and EDS analyses. The formed structure was obtained as compact nanoplates with a size of less than ۱ μm . By calculating the Debye-Scherer equation, the crystal size is less than ۵۰ nm. There were no additional elements in the nanostructure. The synthesized nanostructure was irradiated with ^{60}Co gamma rays with a dose of ۵۰۰ Gy. Its thermoluminescence properties were investigated. By fitting the thermoluminescence curve, the number of peaks below the surface of the thermoluminescence curve and the kinetic parameters corresponding to those peaks were calculated. The glow curve has two peaks at temperatures of ۴۰۵ and ۶۰۵ degrees Kelvin.

Key words: Thermoluminescence, Dosimeter, Lanthanum, Irradiation, Gamma rays.



۱- مقدمه:

ترمولومینسانس^{۴۲} یک پدیده لومینسانس است که بر اثر گرم کردن یک جامد نارسانا یا نیمه‌رسانا دیده می‌شود. در مواد ترمولومینسانس به علت وجود نواقص شبکه و ناخالصی‌های موجود در شبکه کریستالی مراکز گیراندازی در گاف انرژی ایجاد می‌شوند. وقتی ماده تحت تابش یونیزه‌کننده قرار می‌گیرد، الکترون‌ها تحریک شده در نوار هدایت رفته و هنگام بازگشت در مراکز گیراندازی به دام می‌افتد. وقتی نمونه‌ای که پرتودهی شده است را با یک آهنگ گرمادهی ثابت قرائت کنیم، الکترون‌های واقع در مراکز گیراندازی خارج شده و می‌تواند به نوار هدایت بروند و هنگام بازگشت در مرکز باز ترکیب با حفره‌ها ترکیب شده و از خود فوتون گسیل می‌کند که این فوتون‌ها، فوتون‌های ترمولومینسانس هستند [۱]. باریوم فلوراید به دلیل ویژگی‌های انحصاری و متنوع آن، مانند خواص شیمیایی پایدار، ضریب شکست کم، توانایی قوی برای انطباق با شبکه، انرژی فونون کم و شفافیت نوری در محدوده طول موج وسیع، کاربردهای بالقوه متفاوتی دارد. بر اساس این ویژگی‌های مهم، می‌توان از آن در زمینه‌های فیزیک انرژی بالا استفاده کرد [۵-۲]. کریستال باریوم فلوراید یک ماده شفاف با عبور اپتیکی بالا است. BaF_2 در طیف نوری وسیعی از اشعه فرابنفش تا امواج مادون قرمز شفاف است. (از ۲۰۰-۵۰ نانومتر تا ۱۱-۱۱/۵ میکرومتر) که می‌توان برای ساخت اجزاء نوری همانند لنزها و عدسی‌ها کاربرد داشته باشد [۷و۶]. از باریوم فلوراید می‌توان به عنوان ماده‌ای پر کاربرد در ساخت اجزاء نوری، استفاده در آشکارسازی پرتوهای گاما و ایکس، به کارگیری در حسگرها، باتری‌ها و سلول‌های سوختی در دماهای بالا، توموگرافی گسیل پوزیترون، حمام مذاب برای تصفیه آلومینیوم و همچنین آشکارسازی ذرات آلفا و بتا استفاده کرد [۹-۷]. نانوساختار باریوم فلوراید جزء سریع‌ترین مواد لومینسانسی و سوسوزن است [۶]. اما یکی از مهم‌ترین کاربردهای BaF_2 در زمینه دزیمتری است. از BaF_2 آلاینده شده با ناخالصی‌ها در کاربردهای ترمولومینسانس و رادیولومینسانس استفاده می‌شود. در حال حاضر، انواع مختلفی از تکنیک‌ها برای کنترل اندازه، مورفولوژی و بلورینگی BaF_2 وجود دارد. تاکنون نانوساختار باریوم فلوراید با ناخالصی‌های مختلفی از جمله Ce, Eu, Dy و... ساخته شده است [۱۴-۱۰]. در این مقاله به ساخت نانوساختار باریوم فلوراید با ناخالصی La به روش هم‌رسوبی و مطالعه بر روی شکل، ساختار و خواص ترمولومینسانس آن پرداخته شد. منحنی درخشش $BaF_2:La$ دارای دو پیک در دماهای ۴۰۵ و ۶۰۵ درجه کلوین است. بلورهای ساخته شده دارای اندازه ۴۷/۷۹ نانومتر می‌باشد. همچنین پارامترهای گیراندازی و آنالیزهای XRD, SEM و EDS آن بررسی شد.

۲- روش کار:

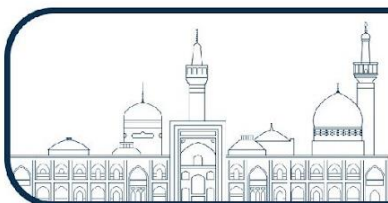
۲-۱- مواد مورد استفاده و روش انجام آزمایش

به منظور ساخت ابتدا مقدار ۰.۵ گرم باریوم نیترات را در ۱۰ سی سی آب دیونیزه حل کرده و سپس ۱/۱۴ گرم آمونیوم فلوراید را در ۱۰ سی سی آب در یک ظرف جداگانه حل کرده و بر روی همزن مغناطیسی قرار دادیم سپس محلول باریوم نیترات و لانتانیم نیترات را در یک ظرف ریخته و ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی با هم ترکیب شدند، سپس آمونیوم فلوراید را کم کم به محلول اضافه کرده و ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه دیگر مواد باهم ترکیب شدند تا محلول شیری رنگی بدست آمد. محلول را جهت شستشو ۴ بار در سانتریفیوژ با آب دیونیزه شستشو داده و در آخرین مرحله رسوب بدست آمده با استفاده از شیشه ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت خشک شد. پودر بدست آمده باریوم فلوراید با ناخالصی لانتانیم است.

۲-۲- آنالیزها

ساختار بلورهای ساخته شده توسط پراش اشعه ایکس (XRD) ارزیابی شد. ریخت‌شناسی نانوذرات با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌های عنصری نمونه با آنالیز EDS مشاهده شد. نمونه تحت تابش ۵۰۰ گری

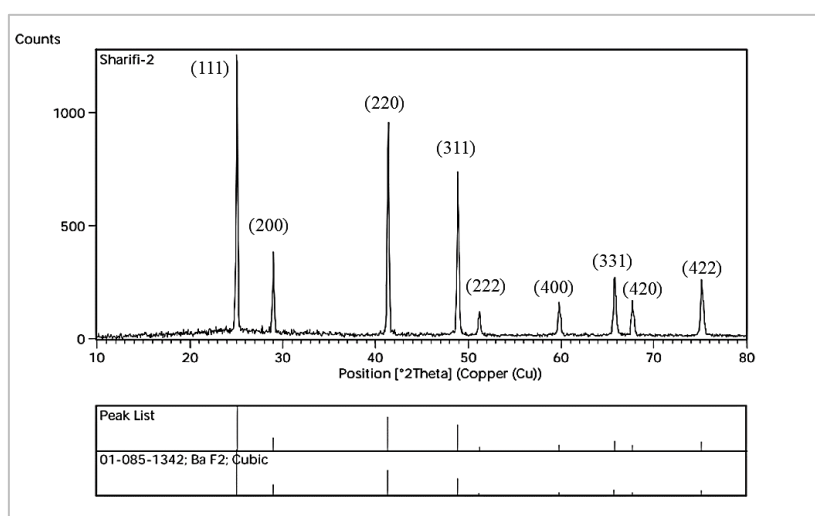
^۱ Thermoluminescence



اشعه گاما قرار گرفت. قرائت TL نمونه با دستگاه TLD-Reader مدل ۴۵۰۰ انجام شد. همچنین برازش منحنی‌ها توسط برنامه کامپیوتری انجام شد.

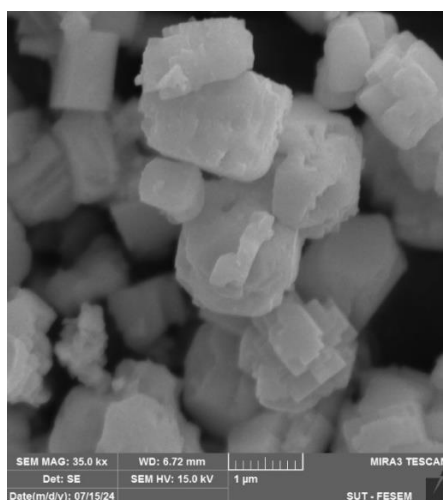
۳- نتایج

به منظور بررسی ساختار کریستالی نانوساختار بدست آمده از آنالیز XRD استفاده می‌شود. طبق نتیجه بدست آمده در شکل (۱) نمونه ساخته شده با کد مرجع ۰۱-۰۸۵-۱۳۴۲ کاملاً هم خوان بوده و دارای ساختار مکعبی شکل می‌باشد. همچنین صفحات واقع در (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۳۳۱)، (۴۲۰) و (۴۲۲) قرار گرفته‌اند. میانگین اندازه بدست آمده با استفاده از رابطه دبی شرر ($D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$) ۴۷.۷۹ نانومتر محاسبه شد.

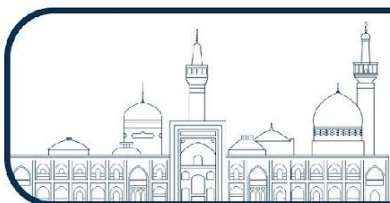


شکل (۱) آنالیز XRD نانوساختار BaF₂:La

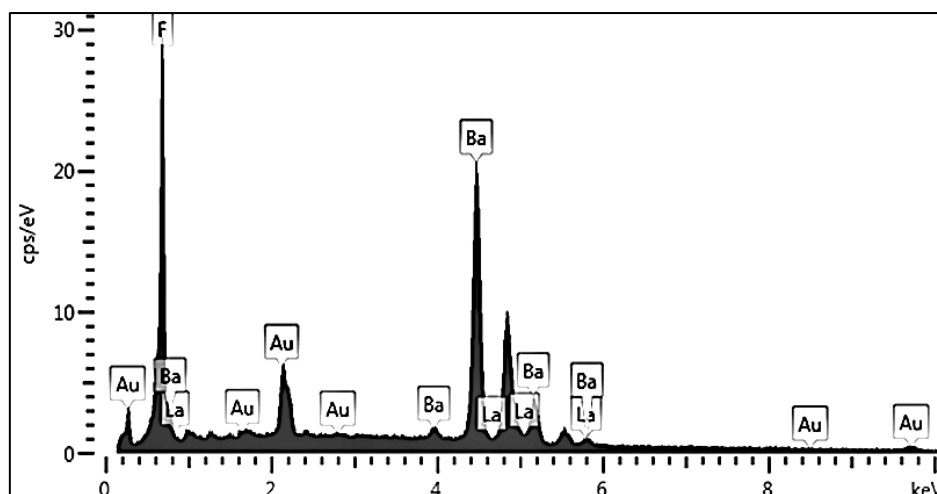
جهت بررسی ریخت‌شناسی از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. طبق نتیجه بدست آمده در شکل (۲) ساختار تشکیل شده به صورت نانوصفحات بسیار به هم فشرده شده می‌باشد. همان گونه که می‌توان در تصویر مشاهده کرد، کلوخه‌های یک میکرومتری متشکل از نانوصفحاتی با ضخامت بسیار کم را می‌توان برای نمونه‌ی نهایی متصور بود.



شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوساختار BaF₂:La

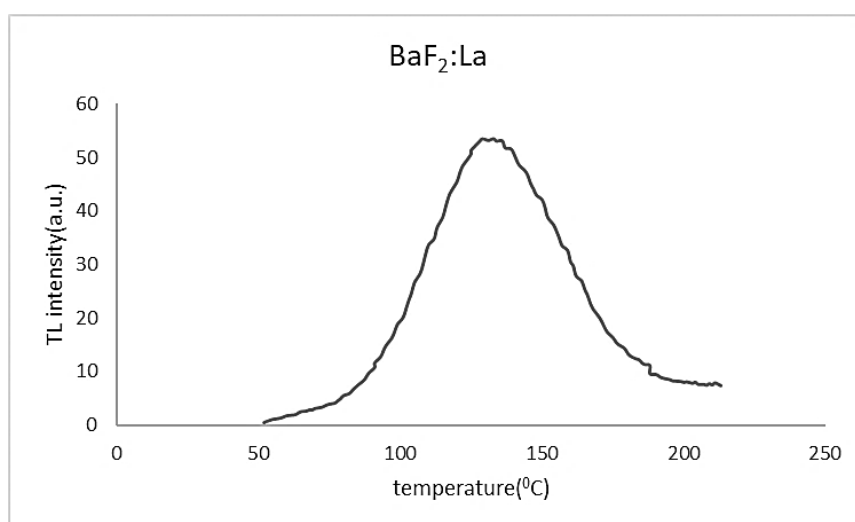


از آنجایی که مقدار ناخالصی بسیار کم بود، به منظور اطمینان از وجود لانتانیوم در ترکیب نهایی از آن آنالیز EDS به عمل آمد. نتیجه آنالیز در شکل (۳) مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله‌های بسیار تیز مربوط به Ba و F نشان‌دهنده مقدار بسیار زیاد این دو عنصر می‌باشد؛ اما علاوه بر آن‌ها عناصری مانند لانتانیوم و طلا نیز مشاهده می‌شود. طلا مشاهده شده مربوط به پوشش طلا اعمال شده به منظور انجام آنالیز SEM است. اما مشاهده مربوط به پیک‌های لانتانیوم اطمینان از حضور این ناخالصی در ترکیب نهایی را برای ما به همراه دارد.



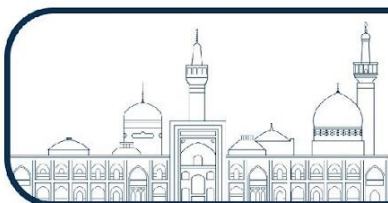
شکل (۳) طیف EDS مربوط به نانوساختار $\text{BaF}_2:\text{La}$

نانوذرات BaF_2 با غلظت $0/3$ مول درصد ناخالصی لانتانیوم به روش هم‌رسوبی ساخته شد و در دمای 500 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه بازپخت شد. سپس نمونه‌ها تحت تابش اشعه گاما به میزان 500 گری قرار گرفت. در شکل (۴) منحنی درخشش ترمولومینسانس نانوذره BaF_2 با مقدار پهنه $0/3$ مول درصد ناخالصی لانتانیوم مشاهده می‌شود.

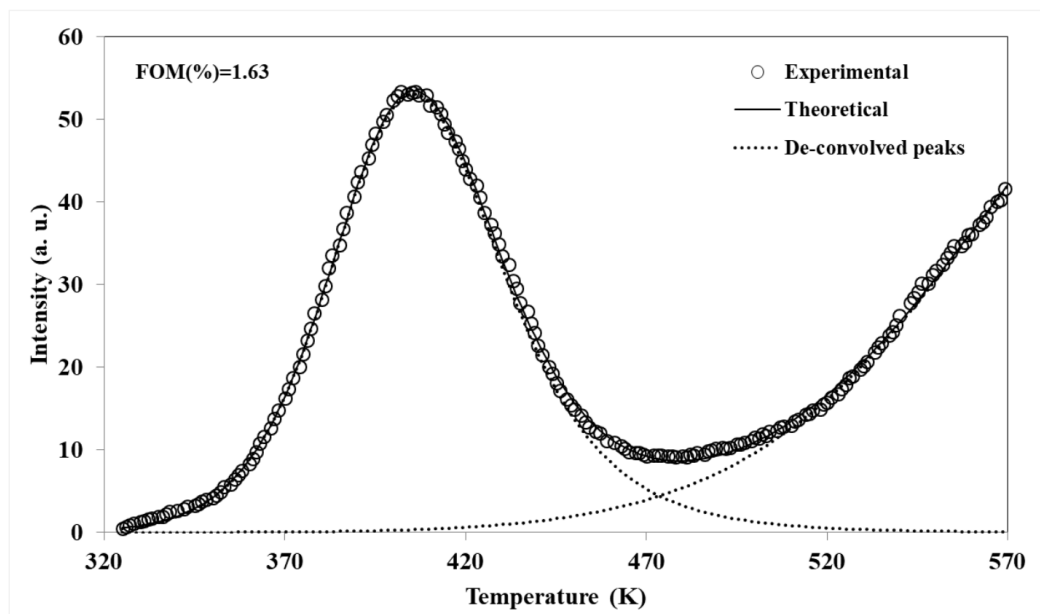


شکل (۴) منحنی درخشش ترمولومینسانس نانوساختار $\text{BaF}_2:\text{La}$

یکی از اطلاعات مهمی که از منحنی TL برداشت می‌شود، تعداد قله‌های زیر سطح منحنی ترمولومینسانس و پارامترهای سینتیک مربوط به آن قله‌ها می‌باشد. در این مقاله برای به دست آوردن پارامترهای گیراندازی از برازش منحنی^۱ استفاده شد. با



برازش منحنی و روش‌های کامپیوتری پارامترهای گیراندازی نمونه بدست آمد. نمونه برازش شده دارای دو پیک در دماهای ۴۰۵ و ۶۰۵ درجه کلوین است. شکل (۵) نمودار برازش شده ترمولومینسانس نمونه را نشان می‌دهد.



شکل (۵) منحنی برازش شده ترمولومینسانس نانوساختار $\text{BaF}_2:\text{La}$

جدول (۱) پارامترهای گیراندازی نانوساختار $\text{BaF}_2:\text{La}$

peak	b	I_m	$T_m(\text{K})$	$E(\text{eV})$	$S(1/\text{s})$	$T^{1/2}$
۱	۲	۵۳.۱۲	۴۰۵.۳۱	۰.۸۲	1.80×10^9	۱۰.۰۹۹
۲	۱.۰۰۱	۵۴.۷۲	۶۰۵.۳۶	۰.۸۶	6226.3064	۳۹.۵۹۹

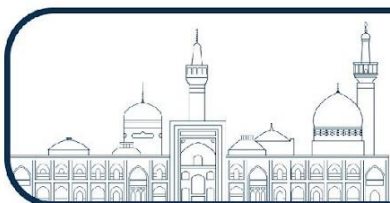
همچنین طبق نتایج، FOM کمتر از ۲.۵ بدست آمده که نشان می‌دهد نتایج تئوری و تجربی انطباق خوبی دارد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

نانوساختار باریوم فلوراید آلائیده شده با ناخالصی لانتانیم با روش هم‌رسوبی ساخته شد؛ و خواص TL آن مورد بررسی قرار گرفت. نانوساختارهای بدست آمده به صورت نانوصفحات به هم فشرده با ابعاد کلی کمتر از ۵۰۰ نانومتر بدست آمده است که ضخامت آن‌ها کمتر از ۵۰ نانومتر است. نانوساختار دارای دو پیک ترمولومینسانس در دماهای ۴۰۵ و ۶۰۵ درجه کلوین است. با مقدار FOM بدست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که نتایج تئوری و تجربی دارای انطباق خوبی می‌باشد.

۵- مراجع:

- [۱] Kishor H. Gavhane, Mahesh S. Bhadane and Akash P. Jadhav et al, "TL properties of $\text{BaF}_2:\text{Ce}$ phosphor for high gamma ray dosimetry" Journal of Luminescence, Vol ۲۰۹, May ۲۰۱۹.



[۲] C. Hu , L. Zhang , R. Y. Zhu , A. Chen , Z. Wang , L. Ying and Z. Yu , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, ۲۰۲۰, ۹۵۰, ۱۶۲۷۶۷,۱ —۱۶۲۷۶۷,۷.

[۳] S. Kurosawa , T. Yanagida , Y. Yokota and A. Yoshikawa , IEEE Trans. Nucl. Sci., ۲۰۱۲, ۵۹, ۲۱۷۳ —۲۱۷۶.

[۴] P. Kagerer , C. I. Fornari , S. Buchberger , S. L. Morelho and F. Reinert , J. Appl. Phys., ۲۰۲۰, ۱۲۸, ۱۳۵۳۰۳,۱ —۱۳۵۳۰۳,۸.

[۵] N. Atanov , Y. Davydov , V. Glagolev , V. Tereshchenko and V. Jmerik , IEEE Trans. Nucl. Sci., ۲۰۲۰, ۶۷, ۱۷۶۰ —۱۷۶۴.

[۶] خانلری محمدرضا، محمدی محمدیاسین، مجتهدزاده مجید "بررسی ویژگی های ساختاری و اپتیکی فیلم نازک باریم فلوراید تهیه شده به روش تبخیر گرمایی در خلأ" در پنجمین کنفرانس ملی خلاء ایران، مشهد مقدر ۱۰ و ۱۱ اسفند ۱۳۹۰، ص ۱۱.

[۷] H.Shi, R.jia,R.I.Eglitis "First Principle simulation on the aggregation of Fcenters inBa:Rcenter" solid State icons ۱۸۷(۲۰۱۱) ۱-۷.

[۸] H.sh:,R.jia, R.I.Eglitis"First Principlrs calculation of surface H centers in BaF۲"phys.Rev.B, ۸۱ (۲۰۱۱) ۱۹۱۵۱۰۱.

[۹] A.A. Demidenko, et al., Opt. Mater. ۳۲ (۲۰۱۰) ۱۲۹۱.

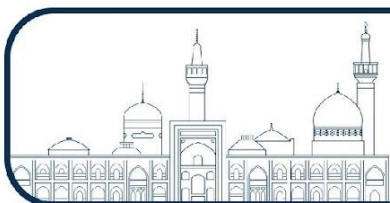
[۱۰] W.A. Bala, V.S. Benitha, K. Jeyasubramanian, G.S. Hikku, P. Sankar, S.V. Kuma, J. Fluor. Chem. ۱۹۳ (۲۰۱۷) ۳۸.

[۱۱] M.Y.A. Yagoub, H.C. Swart, P. Bergman, E. Coetsee, AIP Adv. ۶ (۲۰۱۶) ۰۲۵۰۴.

[۱۲] John B. Czirr, Edward Catalano, Nucl. Instrum. Methods ۱۴۳ (۱۹۷۷) ۴۸۷.

[۱۳] S. Hou, Y. Xing, X. Liu, Y. Zou, B. Liu, X. Sun, Cryst. Eng. Comm. ۱۲ (۲۰۱۰) ۱۹۴۵.

[۱۴] N. Abe, Y. Yokota, T. Yanagida, J. Pejchal, F. Nara, N. Kawaguchi, K. Fukuda, M. Nikl, A. Yoshikawa, Jpn. J. Appl. Phys. ۴۹ (۲۰۱۰) ۰۲۲۶۰۱.



بررسی خصوصیات فوتولومینسانس و ترمولومینسانس LiB_3O_5 (کد مقاله: ۱۱۳۸)

حیات غیبی بلداجی، مهناز^۱ - صادقی، احسان^۲ - زاهدی‌فر، مصطفی^{۱*} - هارونی، سمیه^۱

۱- دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

۲- دانشگاه کاشان، پژوهشکده علوم و فناوری نانو

چکیده:

در این پژوهش نانوذرات بورات لیتیوم LiB_3O_5 با ناخالصی دیسپرسیوم (Dy) به روش حالت جامد سنتز شدند. ساختار، اندازه و شکل نانوذرات توسط آنالیزهای مختلفی از جمله ایکس آر دی و اس ای ام تعیین شدند. اندازه بلورها کمتر از ۵۰ نانومتر است که به صورت میله‌ای در کنارهم رشد کرده اند؛ اندازه ذرات هم باتوجه به بلندترین قله محاسبه شده به کمک رابطه دبای شرر مقدار آن به دست آمد. خواص دزیمتری ترمولومینسانس این نانوذرات نیز مورد بررسی قرار گرفت. پس از پرتودهی توسط کبالت ۶۰ گاما و قرائت به وسیله دستگاه TLD-READER به منظور بهینه سازی درصد ناخالصی دیسپرسیوم، مقدار بهینه ۰/۳ مول درصد برای ناخالصی دیسپریوم به دست آمد؛ و همچنین منحنی درخشش آن طبق بهینه ناخالصی نشان داده شد؛ آنالیز طیف‌سنجی فوتولومینسانس آن نیز بررسی شد و یک قله نشر پهن با تحریک ۲۷۵ نانومتر واقع در تقریباً ۴۲۰ نانومتر در آن دیده شده است.

کلمات کلیدی: نانوذرات، ترمولومینسانس، تابش گاما، $\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Dy}$, PL

Investigating photoluminescence and thermoluminescence properties of LiB_3O_5

Hayatgheiby Boldaji.Mahnaz^{۱*} - Sadeghi, Ehsan^{۱,۲} - Zahedifar, Mostafa^{۱,۲} - Haroni, Somayeh^۱

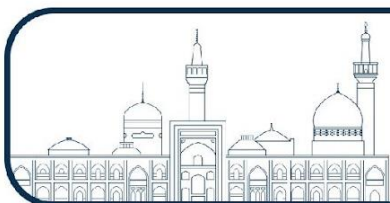
۱- University of Kashan, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics

۲- University of Kashan, Institute of Nanoscience and Nanotechnology

Abstract:

In this study, lithium borate nanoparticles LiB_3O_5 with dysprosium (Dy) impurity were synthesized by solid-state method. The structure, size and shape of the nanoparticles were determined by various analyses including XRD and SEM. The crystal size is less than ۵۰ nm and has grown in a rod-like manner; the particle size was also obtained according to the highest peak calculated using the Debye-Scherrer relationship. The thermoluminescence dosimetric properties of these nanoparticles were also investigated. After irradiation with cobalt-۶۰ gamma and reading by TLD-READER device in order to optimize the percentage of dysprosium impurity, an optimal value of ۰,۳ mol% for dysprosium impurity was obtained; and its glow curve was also shown according to the optimum impurity; its photoluminescence spectroscopy analysis was also investigated and a broad emission peak with excitation at ۲۷۵ nm located at approximately ۴۲۰ nm was observed in it.

Key words: Nanoparticles, Thermoluminescence, Gamma radiation, PL, $\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Dy}$

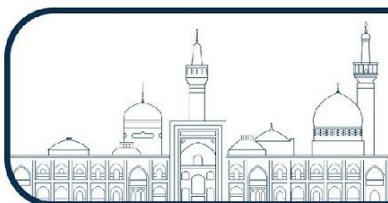


۱- مقدمه:

یک دزیمتر ایده‌آل ویژگی‌های به خصوصی باید داشته باشد؛ از جمله دارای پایداری شیمیایی باشد، نسبت به یکسری شرایط از جمله دما و رطوبت مقاوم باشد و رابطه خطی برقرار باشد، و مهمترین ویژگی که می‌تواند دارا باشد عدداتی موثر معادل با بافت بدن است [۱]. تترابورات لیتیوم، از جمله مواد پرکاربرد در زمینه میزبانی است. این ماده به دلیل ویژگی‌های زیاد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲،۳]. لیتیوم تترابورات ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) به اختصار LTB نامیده میشود. این ترکیب، ساختار بلوری تتراگونال را دارا می‌باشد؛ و دارای گاف انرژی حدود $6/2 - 9/3$ الکترون ولت است [۴،۵]. ویژگی‌هایی از جمله، داشتن ماده عایق با شکاف باند ۹ الکترون ولت و معادل بودن با بافت بدن، حساسیت قابل توجه، انتقال پذیری بالای UV در طول موج‌های معین و همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی مورد علاقه پژوهشگران قرار گرفته است [۵،۶،۷،۸،۹،۱۰]. به دلیل بهبود بخشیدن به حساسیت، از ناخالصی‌هایی استفاده میشود. شکل منحنی هر ماده به غلظت ناخالصی‌ها، روش سنتز و عواملی از این قبیل بستگی دارد [۶،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴]. شولمن، اولین کسی بود که استفاده از لیتیوم بورات با ناخالصی منگنز را برای دزیمتری پرتو پیشنهاد کرد، پس از شولمن، دانشمندان زیادی طی تحقیقات و پژوهش‌های خود ناخالصی‌های متعددی از جمله نقره، مس و فسفر را جایگزین منگنز کردند؛ که هر کدام به نتیجه‌ای رسیدند. طی تحقیقات متوجه شدند که تولیم (عنصر خاکی کمیاب) جایگزین خوبی برای فسفر است. یون‌های خاکی کمیاب که در آن‌ها انتقال نوری بین سطوح انرژی رخ می‌دهد تحت تاثیر قرار می‌گیرند و در ترمولومینسانس، امکان ایجاد تله‌های الکترونی را فراهم می‌کنند [۶]. بروان اسکیل در ادامه تحقیقات شولمن این ماده را برای استفاده و تولید آشکارساز هم‌ارز بافت گسترش داد؛ که این دزیمتر تحت نام تجاری TLD-۸۰۰ شناخته شد [۱۵،۱۶]. دزیمتری لیتیوم تترابورات آلاینده شده با منگنز، به دلیل عدم تطابق طیف نوری ساطع شده با طیف پاسخ‌دهی دستگاه اندازه‌گیری، حساسیت پایینی داشت. تکنیکا و همکارانش با جایگزینی منگنز با مس و استفاده از روش پخت حالت جامد، موفق به تولید دزیمتری با طیف انتشار بهینه (۳۷۰ نانومتر) شدند. این تغییر، تطابق بهتری بین طیف نوری دزیمتر و دستگاه اندازه‌گیری ایجاد کرده و در نتیجه حساسیت دزیمتری را به طور قابل توجهی افزایش داد [۱۷]. در مطالعه و پژوهشی دیگر، از منیزیم به عنوان ناخالصی استفاده شده است؛ که دارای پاسخ خطی $2/4$ گری بوده است. حساسیت خوب، منحنی درخشش ساده و پاسخ خطی در محدوده قابل توجهی از دزها، از جمله ویژگی‌های خوب فسفر تهیه شده هستند که آن‌ها را به گزینه بهتری برای دزیمتر تبدیل می‌کند [۱۸]. طی تحقیقاتی دیگر، بورات لیتیوم با ناخالصی سریم به شکل قرص تحت تابش بتا قرار دادند؛ که مشاهده کردند قرص‌ها قابلیت تکرارپذیری خوبی دارند و پاسخ دز در محدوده ۴۱ میلی گری تا ۴۲ گری خطی است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند؛ که این قرص‌های تولید شده در این کار، پتانسیل استفاده به عنوان دزیمتر ترمولومینسانس را دارند. در پژوهشی دیگر که توسط گروهی انجام شد، خواص ترمولومینسانس و OSL نانوذرات لیتیوم تترابورات آلاینده شده با مس و نقره مورد مطالعه قرار گرفت. محققان دریافتند که آلاینده نقره به طور قابل توجهی حساسیت نانوذرات را افزایش می‌دهد، به طوری که نمونه‌های LTB:Ag با درصد آلاینده‌گی ۱ درصد، پاسخ خطی بسیار خوبی در بازه دزی ۵۰ میلی گری تا ۲۰ گری از خود نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نانوذرات LTB:Ag پتانسیل بالایی برای کاربرد در دزیمتری، به ویژه در اندازه‌گیری دزهای بتا و دزیمتری همزمان، دارند.

۲- روش کار:

در این پژوهش، نانوذرات بورات لیتیوم با ناخالصی دیسپرسیوم به روش حالت جامد سنتز شدند. لیتیوم کلرید (LiCl) با بوریک اسید (H_3BO_3) به عنوان ماده میزبان استفاده شدند. پس از انجام محاسبات استوکیومتری، مقدارهای لازم به دست آمده و سنتز شدند. ابتدا دو پیش ماده اصلی باهم مخلوط شده و به مدت ۱۰ دقیقه در هاونگ ساییده شدند؛ سپس ناخالصی به ماده افزوده شد و محلول به دست آمده را در کوره‌ای که از قبل در دو مرحله تنظیم شده قرار گرفت. در مرحله اول به مدت ۳ ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده و سپس دمای کوره با اهنگ دمایی مشخص تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد افزایش داده و در این دما به مدت ۲ ساعت نگه داشته شدند. طی این مدت مواد با یکدیگر واکنش داده و مواد اضافی تبخیر شدند. پودر

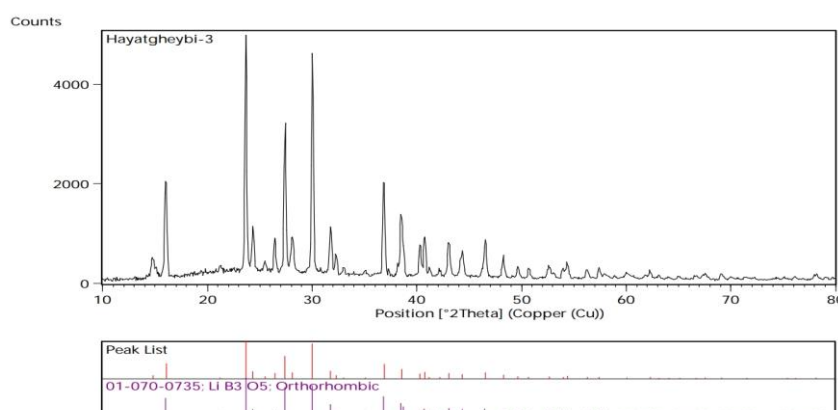


به دست آمده پس از سرد شدن، مجدداً در هاونگ ساییده شده؛ ماده حاصل در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه بازپخت می‌شود. در نهایت پودری حاصل می‌شود که نانوذرات بورات لیتیوم با ناخالصی دیسپرسیوم است.

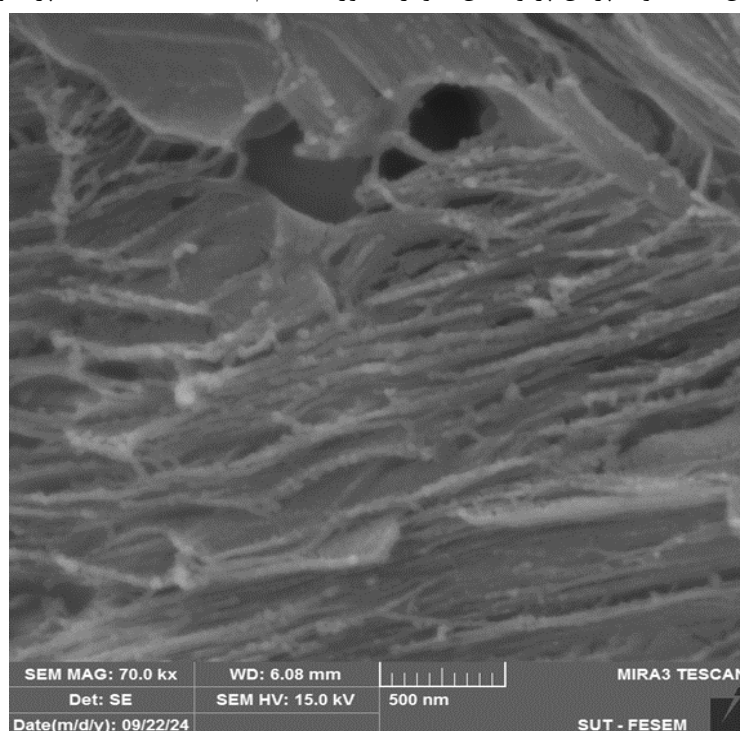
۳- نتایج:

۳-۱- ساختارشناسی نانوذرات

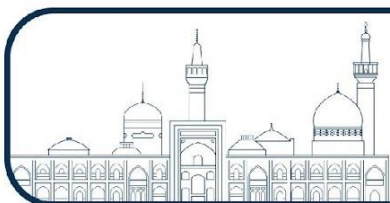
در ساختارشناسی نانوذرات برای بررسی ساختار نمونه‌ها از الگوی پراش اشعه ایکس استفاده شد. شکل ۱ الگوی XRD نانوذرات تری بورات لیتیوم آلیش یافته با ۰/۳ مول درصد ناخالصی دیسپرسیوم (Dy) سنتز شده به روش حالت جامد را نشان می‌دهد؛ کد مرجع ۰۱۰۷۰۰۷۳۵ مربوط به LiB_3O_5 با ساختار اورترومبیک هم‌خوان می‌باشد. این نشان‌دهنده‌ی صحت سنتز انجام شده برای دستیابی به این ساختار می‌باشد. میانگین اندازه ذرات با توجه به بلندترین قله و رابطه‌ی دبی شرر ($D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$) به دست آمد که میانگین این اندازه ۳۴ نانومتر گزارش می‌شود.



شکل (۱): الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات بورات لیتیوم آلیایده شده با دیسپرسیوم



شکل (۲): تصویر SEM نانوذرات Dy: LiB_3O_5 سنتز شده.

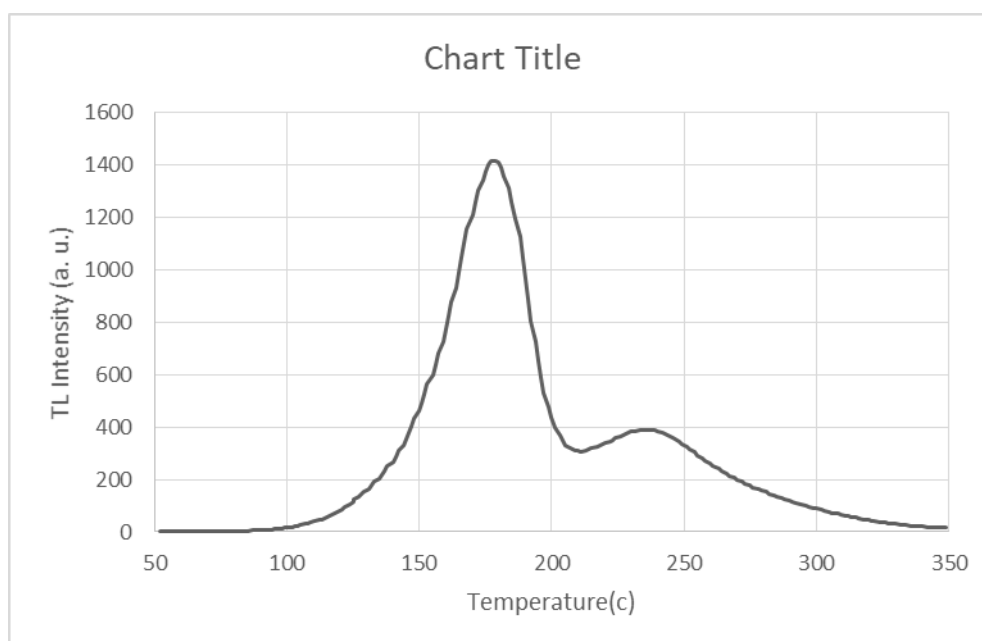


به منظور ریخت‌شناسی و تخمین دیگری از اندازه ذرات ساخته شده آنالیز SEM به عمل آمد. این آنالیز با دستگاه واقع در دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفت. با توجه به تصاویر به دست آمده که در شکل ۲ قابل مشاهده است؛ ذرات بسیار ریزی که به صورت نانومیل‌های صفحه‌ای شکل در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ همچنین اندازه ذرات کمتر از ۵۰ نانومتر است.

۳-۲- بررسی ویژگی‌های دزیمتری ترمولومینسانس

منحنی درخشش

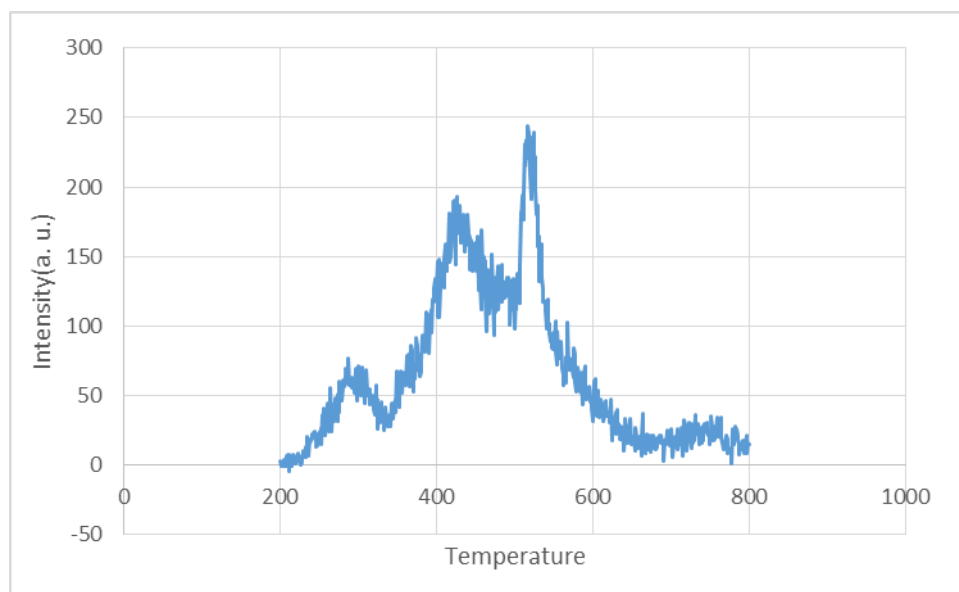
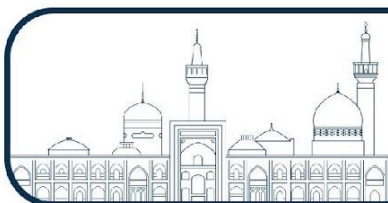
با توجه به بررسی‌های انجام شده بهینه غلظت ناخالصی برای ما مشخص شد. که بهینه غلظت ناخالصی طبق منحنی TL و بررسی‌ها ۰/۳ مول درصد به دست آمد که با توجه به آن، شکل ۳ منحنی درخشش بهینه غلظت ناخالصی را به ما نشان می‌دهد.



ساخته شده به روش حالت جامد در پرتودهی گاما $\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Dy}$ (شکل ۳): منحنی نانوذرات

PL

به منظور بررسی نشر نانوساختار به دست آمده از آنالیز فوتولومینسانس استفاده شده، در این آنالیز طول موج تحریکی ۲۰۰ نانومتر به کار گرفته شده؛ با توجه به نتایج به دست آمده نشر نسبتاً پهن وجود دارد. این قله نشان‌دهنده‌ی نشر این ساختار در این بازه‌ی طول موجی می‌باشد که بسیار همخوان با اکثر PMT‌های موجود در دستگاه‌های مربوط به آشکارسازی پرتوهاست؛ از این سو به نظر می‌رسد که بتوان انتظار بازده مناسبی برای استفاده از این نانوذرات به منظور دزیمتری داشت.



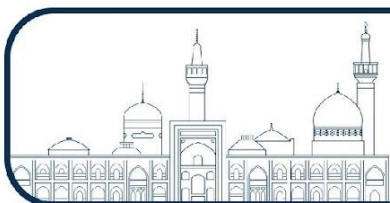
شکل (۴): منحنی فوتولومینسانس نانوذرات

۴- نتیجه‌گیری

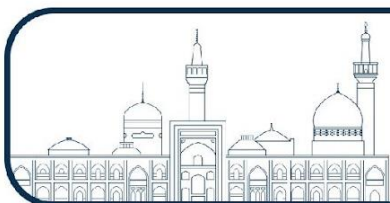
در این پژوهش نانوذرات $\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Dy}$ به روش حالت جامد سنتز شدند؛ مشاهده شد که غلظت ناخالصی به کاررفته در نانوذرات، در شدت ترمولومینسانس موثر است. بیشترین حساسیت در 0.3 مول درصد ناخالصی دیسپرسیوم به دست آمد؛ و با توجه به بررسی ساختارشناسی، نانوذرات به صورت میله‌ای در کنارهم رشد کرده‌اند و اندازه ذرات زیر 50 نانومتر بدست آمد. طبق گزارش فوتولومینسانس یک قله نشر را مشاهده کردیم.

۵- مراجع:

- [۱] Schulman, J. H., Kirk, R. D., & West, E. J. (۱۹۶۵). Luminescence dosimetry. In USAEC Symposium Series ۶۵۰۶۳۷ (pp. ۱۱۳).
- [۲] Benavente, J. F., Gómez-Ros, J. M., & Correcher, V. (۲۰۲۰). Characterization of the thermoluminescence glow curve of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$. Radiation Measurements, ۱۳۷, ۱۰۶۴۲۷.
- [۳] Martini, M., Furetta, C., Sanipoli, C., Scacco, A., & Somaiah, K. (۱۹۹۵). Spectrally resolved thermoluminescence of Cu and Eu doped $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, ۱۳۵(۱-۴), ۱۳۳-۱۳۶.
- [۴] Pekpak, E., Yilmaz, A., & Ozbayoglu, G. (۲۰۱۰). An overview on preparation and TL characterization of lithium borates for dosimetric use. The Open Mineral Processing Journal, ۳(۱).
- [۵] Fernandes, A. C., Osvay, M., Santos, J. P., Holovey, V., & Ignatovych, M. (۲۰۰۸). TL properties of newly developed lithium tetraborate single crystals. Radiation Measurements, ۴۲(۲-۶), ۴۷۶-۴۷۹.



- [۶] González, P. R., Ávila, O., Mendoza-Anaya, D., Escobar-Alarcón, L., & González-Romero, A. (۲۰۲۰). Synthesis, luminescent and dosimetric properties of $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Tm}$. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.
- [۷] González, P. R., Ávila, O., Escobar-Alarcón, L., & Mendoza-Anaya, D. (۲۰۲۰). Dosimetric properties of $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Cu}, \text{Ag}, \text{P}$ solid detector. *Applied Radiation and Isotopes*, ۱۶۲, ۱۰۹۱۷۴.
- [۸] Sharifzadeh, M., & Gorjifard, R. (۲۰۰۸). Characterization of a new prepared $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Mn}$ dosimeter for γ -irradiation high-dose dosimetry. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A*, ۳۲(A۳).
- [۹] Cruz, A. R. P., Amorim, L. M. F., Silva, A. C., Asfora, V. K., Barros, V. S. M., Pinto, A. T. M., Oliveira, C. N. P., Virginio, J. F., & Khoury, H. J. (۲۰۲۲). Evaluation of the application of $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Cu}, \text{Ag}$ optically stimulated dosimeter for sterile insect technique. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, ۱۰-۰۲A, ۰۱-۱۵.
- [۱۰] Özdemir, A. (۲۰۲۰). Investigation of dosimetric properties of newly-developed $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Ag}^+, \text{La}^{3+}$ using thermoluminescence (TL) technique. *Journal of Alloys and Compounds*, ۸۲۲, ۱۵۳۷۲۲.
- [۱۱] Singh, L., Chopra, V., & Lochab, S. P. (۲۰۱۱). Synthesis and characterization of thermoluminescent $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}$ nanophosphor. *Journal of Luminescence*, ۱۳۱(۶), ۱۱۷۷-۱۱۸۳.
- [۱۲] Soheilian, S., Movahedi, B., Nasrabadi, M. N., & Jabbari, I. (۲۰۱۶). A different approach to fabricate nanocrystalline LTB: Cu pellets with thermoluminescence response. *Radiation Measurements*, ۸۹,
- [۱۳] Vij, D. (۲۰۱۲). *Luminescence of solids*. Springer Science & Business Media.
- [۱۴] Pekpak, E., Yilmaz, A., & Ozbayoglu, G. (۲۰۱۰). An overview on preparation and TL characterization of lithium borates for dosimetric use. *Open Mineral. Process. J.*, ۳.
- [۱۵] Schulman, J. H., Kirk, R. D., & West, E. J. (۱۹۶۷). *Use of Lithium Borate for Thermoluminescence Dosimetry*. Stanford University, Stanford, California, US.
- [۱۶] Brunli, R. T., & Ukaea, P. G. (۱۹۶۸). Report ۸۳۷ (W). HMSO, London.
- [۱۷] Takenaga, M., Yamamoto, O., & Yamashita, T. (۱۹۸۰). Preparation and characteristics of $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Cu}$ phosphor. *Nuclear Instruments and Methods*, ۱۷۵, ۷۷-۷۸.
- [۱۸] Chimezie, C. F., Aisida, S. O., Ezekoye, V. A., Onwuraha, B., & Agwub, K. K. (۲۰۲۰). Characterization and gamma dose-response of multicrystalline $\text{Li}^+\text{B}^{3-}\text{O}^{2-}:\text{Mg}$ phosphor prepared by the melting zone method. *Radiation Physics and Chemistry*, ۱۷۷, ۱۰۹۱۲۱.



طراحی و ایجاد بانک داده از داده‌های خام آشکارسازهای قطعه‌بندی شده پادنوترینو برای استفاده در الگوریتم‌های یادگیری عمیق به منظور طبقه‌بندی رویدادها (کد مقاله : ۱۱۸۰)

کریمی، جواد^۱ - رحمانی، فائزه^۱ - جیا، سید بیژن^۲

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

۲- دانشگاه بجنورد، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده:

جداسازی ذرات و تمییز پادنوترینو از سایر ذرات به ویژه مئون کیهانی یک مسئله و هدف مهم در آشکارسازی پادنوترینو محسوب می‌شود. یادگیری عمیق به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها در حوزه‌های مختلف پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری مطرح است و می‌تواند برای جداسازی ذرات هم استفاده شود. روش سنتی جداسازی ذرات مبتنی بر شکل پالس بر اساس دو مولفه انرژی و زمان، دارای دقت کافی برای جداسازی پادنوترینو از مئون نیست. در آشکارسازهای قطعه‌بندی از اطلاعات مکانی مربوط به مکان به جاگذاری انرژی نیز می‌توان استفاده کرد، یادگیری عمیق این امکان را می‌دهد تا بتوان اطلاعات مکانی را نیز به زمان و انرژی مرتبط کرد. یکی از چالش‌های اصلی در یادگیری عمیق، فراهم کردن بانک داده برای آموزش مدل‌ها است. این مقاله روش‌هایی در خصوص ایجاد بانک داده در آشکارسازهای قطعه‌بندی شده پادنوترینو پیشنهاد می‌کند. روش پیشنهادی با ترکیب رفتار زمانی، مکانی و انرژی رویدادها، به تولید تصاویر ساختگی با دقت بالا و جزئیات متنوع می‌پردازد که می‌توانند به عنوان داده‌های برچسب‌گذاری شده خودکار استفاده شوند و بازدهی تشخیص را افزایش دهد.

کلمات کلیدی: آشکارسازهای قطعه‌بندی شده، پادنوترینو، یادگیری عمیق، بانک داده، تشخیص ذرات.

Design and creation of a dataset of raw data from antineutrino segmented detectors for use in deep learning algorithms for event classification

Karimi, Javad^۱, Rahmani, Faezeh^{۱*}, Jia, Sayyed Bijan^۲

^۱-KNTU University, Faculty of physics, Department of nuclear physics

^۲-University of Bojnord, Faculty of physics, Department of nuclear physics

Abstract

Particle identification and discrimination of antineutrinos from other particles, especially cosmic muons is an important problem and goal in antineutrinos detection. Deep learning is one of the most widely used methods in various fields of image processing and computer vision and can also be used for particle separation. The traditional particle separation method based on pulse shape, relying on two components of energy and time, does not provide sufficient accuracy for distinguishing antineutrinos from muons. In segmented detectors, spatial information related to the energy deposition location can also be used. Deep learning enables the correlation of spatial information with time and energy. One of the main challenges in deep learning is providing a dataset for training models. This paper proposes methods for creating a data bank in antineutrino segmented detectors. By combining the temporal, spatial, and energy behavior of events, the proposed method produces high-resolution and detailed artificial images that can be used as automatically labeled data and increase the detection efficiency.

Key words: Segmented detectors, Antineutrino, Deep learning, Data set, Particle identification



۱- مقدمه:

آشکارسازهای قطعه‌بندی شده در حوزه‌های مختلفی از جمله آشکارسازی ذرات بنیادی مانند میون و پادنوترینو کاربرد دارند. علاوه بر این نوع آشکارسازها برای توموگرافی و سایر زمینه‌های آشکارسازی هم می‌توان استفاده کرد. با گسترش و توسعه هوش مصنوعی در چند سال اخیر و فراگیر شدن آن به خصوص در بخش یادگیری عمیق که عمدتاً بر مبنای تصاویر است، از این روش در فرآیندهای آشکارسازی ذرات مانند شناسایی ذرات یا جداسازی ذرات استفاده شده است [۱-۵]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آشکارسازهای قطعه‌بندی شده، آشکارسازی پادنوترینو است که برای آشکارسازی پادنوترینوهای گسیل شده از راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. روشی که در این پژوهش پیشنهاد شده می‌تواند به نوعی روش تبعیض شکل پالس (Pulse shaping discrimination) پیشرفته قلمداد شود که قابلیت استفاده از یادگیری عمیق (Deep learning) برای تشخیص و تمیز رویدادها را ممکن می‌کند و یکی از کاربردهای مهم آن در آشکارسازی پادنوترینوهاست.

۲- روش کار:

در یادگیری ماشین و هوش مصنوعی وجود بانک داده قابل اتکا برای فرآیند آموزش یکی از کلیدی‌ترین و ابتدایی‌ترین پیش‌نیازهای استفاده از این روش است. داده‌های مورد استفاده در یادگیری ماشین باید به اندازه کافی زیاد (بزرگ) باشند، چون در غیر این صورت احتمال بروز بیش برازش (overfitting) وجود دارد. همچنین باید متنوع و بازتابی از مسائل واقعی باشند. علاوه بر آن داده‌ها باید پاک‌سازی شده (تمیز شده) به منظور استفاده در یادگیری ماشین باشند. نوع و فرمت ذخیره‌سازی و برچسب‌گذاری در داده‌ها بسیار حائز اهمیت است و در عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین موثر است.

۱-۲- تولید بانک داده

در این کار از کد مونت کارلوی IRAND-Sim برای تهیه داده‌ها استفاده شده است [۶]. IRAND-Sim یک بسته نرم‌افزاری بر مبنای کد C++ است که می‌توان با استفاده از آن آشکارسازهای قطعه‌بندی شده پادنوترینو را شبیه‌سازی کرد. از مزایای این کد این است که می‌توان داده‌ها را به صورت داده خام تولید و ذخیره‌سازی کرد. خروجی‌های IRAND-Sim واقع شاخصه‌ها و ویژگی‌های فوتون‌های مرئی‌ای هستند که در فرآیند سوسوزنی در سوسوزن‌های پلاستیک قطعه‌بندی شده تولید شده‌اند و پس از انتشار به فوتوکاتد در PMT رسیده‌اند و منجر به تولید فوتوالکترون شده‌اند. بدین ترتیب نتایج تا حد امکان به واقعیت نزدیک است. این ویژگی‌ها عبارتند از:

- ۱- زمان برخورد فوتون‌های مرئی (با برچسب time) (که رفتار زمانی رویدادها از این ویژگی قابل استخراج است).
 - ۲- طول موج فوتون رسیده به فوتوکاتد (با برچسب Edep) (که با توجه به بازدهی کوانتومی فوتوکاتد احتمال تبدیل این فوتون به فوتوالکترون از روی این ویژگی قابل نمونه برداری است).
 - ۳- شماره ماژولی که در ساختار قطعه‌بندی شده فعال شده است (با برچسب CathodeNumber) (که رفتار توپولوژی هر رویداد از این ویژگی قابل استخراج است).
 - ۴- شماره رویدادی که منجر به تولید این فوتون‌ها شده است (با برچسب EID) (که این برچسب در فرآیند آموزش در یادگیری ماشین نظارت شده بسیار مهم است).
- همچنین از روی آمار تعداد فوتون‌هایی که به فوتوکاتد می‌رسند می‌توان بسیاری از رفتار رویدادها از جمله انرژی به جا مانده از هر رویداد در آشکار ساز را استخراج کرد.
- با این ویژگی‌ها می‌توان رفتار یک آشکارساز قطعه‌بندی شده را استخراج کرد و اطلاعاتی که نیاز است در قالب بانک داده ذخیره‌سازی نمود. سه نوع داده‌ای که در این آشکارساز قطعه‌بندی شده ما با آن سر و کار خواهیم داشت عبارتند از اندرکنش بتای معکوس (ترکیب پادنوترینو با پروتون که منجر به تولید پوزیترون و یک نوترون می‌شود)، میون عبوری (میون کیهانی که



انرژی زیادی دارد و از آشکارساز عبور می‌کند و در آشکارساز متوقف و واپاشی نمی‌شود)، میون متوقف شده (میونی که انرژی کمی دارد و در آشکارساز متوقف شده و واپاشی می‌شود).

۲-۲- آماده سازی و ذخیره سازی بانک داده

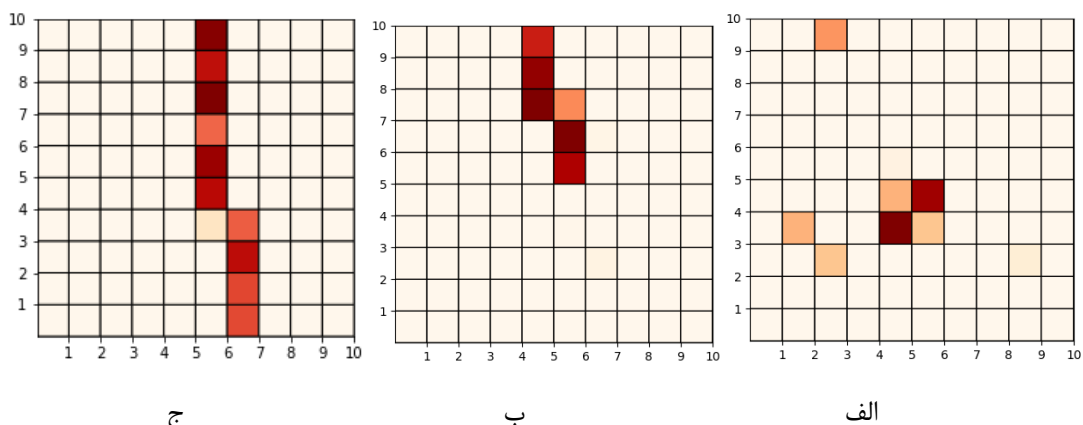
برای آماده سازی داده‌ها از کتابخانه‌های پایتون استفاده شده است. قابلیت‌های مهمی که کتابخانه‌های نامپای (Numpy)، پانداس (Pandas)، سای پای (SciPy) برای آماده سازی و تحلیل داده‌ها در اختیار کاربر می‌گذارند به همراه قابلیت‌هایی که کتابخانه‌های مت پلات لیب (Matplotlib) و سیبرن (Seaborn) برای ایجاد داده‌های تصویری در اختیار می‌گذارند برای ایجاد بانک داده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال وقتی از قابلیت قاب داده (dataframe) در پانداس استفاده می‌کنیم می‌توانیم از داده‌های خام با استفاده از روش KDE (kernel density estimation) سیگنال زمانی یک رویداد را استخراج و ذخیره کنیم. همچنین می‌توان ترتیب روشن شدن ماژول‌ها در یک ساختار قطعه‌بندی شده را از دل داده‌های خام با قابلیت ماسک گذاری و استفاده از روش loc در قاب داده پانداس استخراج نمود.

با استفاده از روش pcolor در مت پلات لیب رفتار توپولوژی هر رویداد در یک ساختار قطعه‌بندی شده ۱۰ در ۱۰ قابل استخراج است.

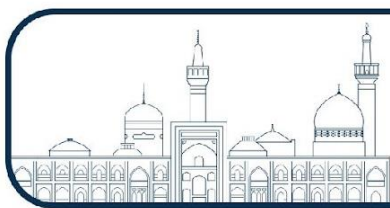
در بخش بعدی نتایج حاصل از این داده کاوی و ذخیره سازی ارائه شده است.

۳- نتایج:

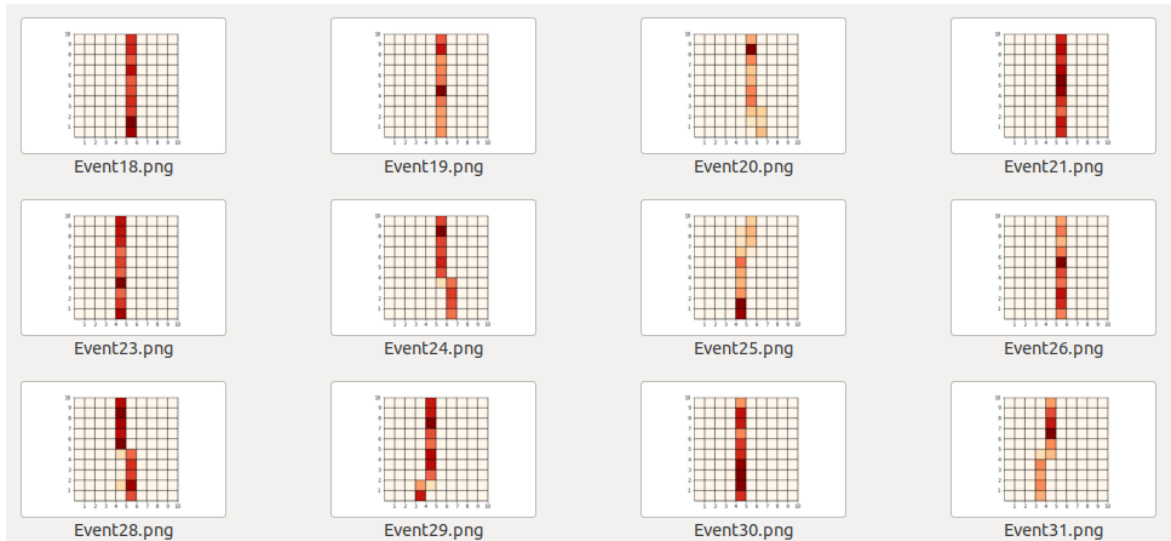
با استفاده از کتابخانه‌های گفته شده در بخش قبل نتایج به صورت تصویر استخراج شده و در بانک داده ذخیره سازی شدند. خروجی‌ها که به صورت مجموعه داده به همراه کدهای مولد آن است در آدرس [۷] بارگذاری شده است و در دسترس است. بانک داده شامل سه بخش است. بخش اول مربوط به رفتار توپولوژی رویدادهاست. به عبارت دیگر در این قسمت هر رویداد به صورت یک تصویر ۱۰۰ پیکسلی که هر پیکسل متناظر با یک ماژول سوسوزنی است ذخیره می‌شود. شکل ۱ سه ساختار متناظر با ۳ رویداد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است هر رویداد رفتار متمایزی در روشن کردن ماژول‌ها دارد.



شکل (۱) الف) توپولوژی رویداد اندرکنش بتای معکوس ب) توپولوژی رویداد میون متوقف شده در آشکارساز ج) توپولوژی رویداد میون عبوری از آشکارساز



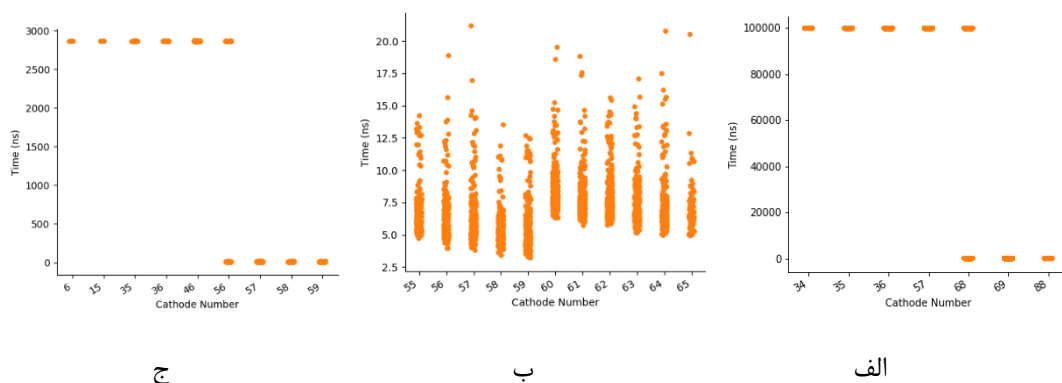
قسمتی از این بانک داده در شکل ۲ نشان داده شده است این رویدادها مربوط به میون‌هایی هستند که با انرژی زیاد از آشکارساز عبور می‌کنند و فرصت واپاشی ندارند و با عنوان میون عبوری برچسب‌گذاری شده‌اند تا در فرآیند یادگیری عمیق استفاده شوند.



شکل (۲) نمونه‌ای از داده‌ها (تصویرها) توپولوژی رویداد میون عبوری

این داده‌ها به صورت برچسب‌گذاری شده برای رویدادهای میون متوقف شده در آشکارساز و اندرکنش بتای معکوس هم وجود دارند.

ترتیب روشن شدن ماژول‌ها در ساختار قطعه‌بندی شده که نشان دهنده رفتار زمانی هر رویداد است در شکل ۳ قابل مشاهده است.

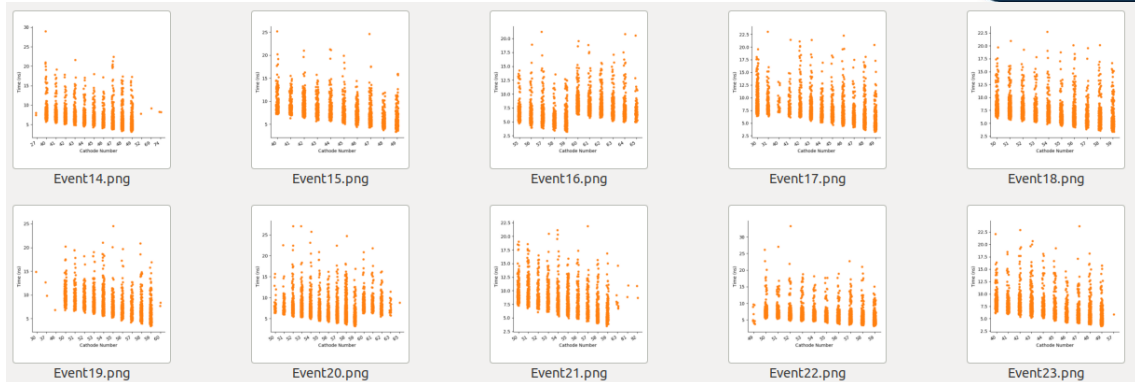


ج

ب

الف

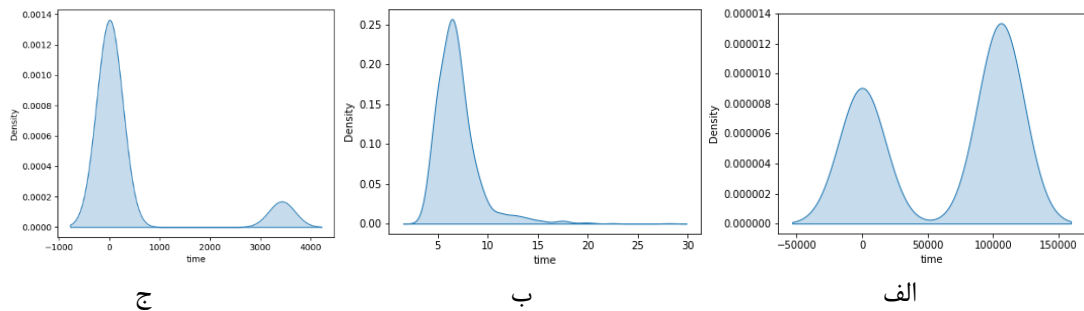
شکل (۳) ترتیب روشن شدن ماژول‌ها در (الف) رویداد اندرکنش بتای معکوس (ب) میون عبوری (ج) میون متوقف شده از هر کدام از این نوع رویدادها بانک داده‌ای ایجاد شده است و نوع رویداد برچسب‌گذاری شده است. در شکل ۴ به عنوان نمونه می‌توان قسمتی از تصاویر که مربوط به رویداد میون عبوری است مشاهده کرد.



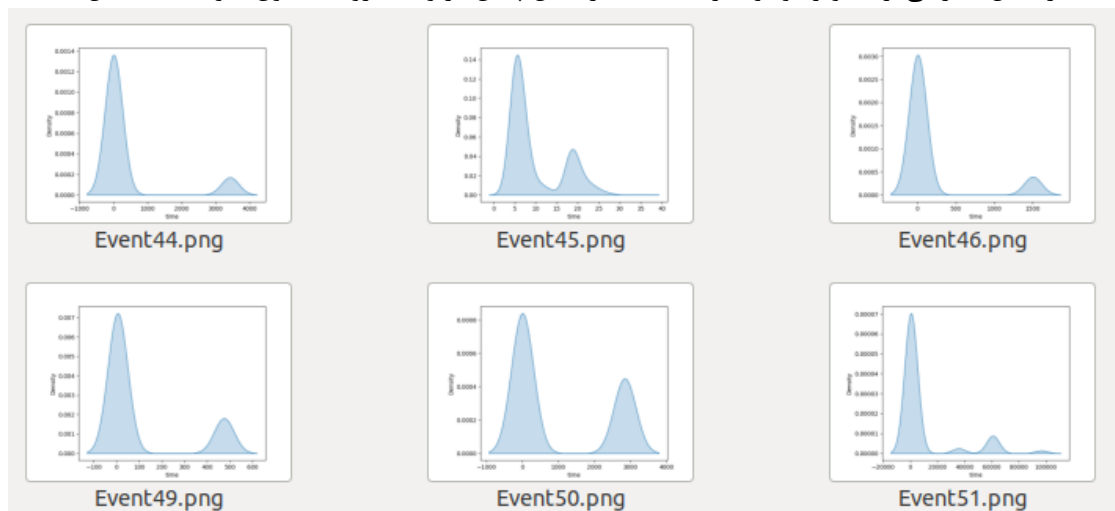
شکل (۴) برخی از تصاویر موجود در بانک داده مربوط به رفتار زمانی میون عبوری.

شکل پالس هر رویداد هم می‌تواند حاوی اطلاعات منحصر به فردی از نوع رویداد باشد.

در شکل ۵ شکل پالس سه رویداد اندرکنش بتای معکوس، میون عبوری و میون متوقف شده آورده شده است.



شکل (۵) شکل پالس رویدادهای الف) اندرکنش بتای معکوس ب) میون عبوری ج) میون متوقف شده.
در شکل ۶ برخی از تصاویر موجود در بانک داده از شکل پالس مربوط به رویداد میون متوقف شده قابل مشاهده است.



شکل (۶) قسمتی از بانک داده از شکل پالس مربوط به رویداد میون متوقف شده

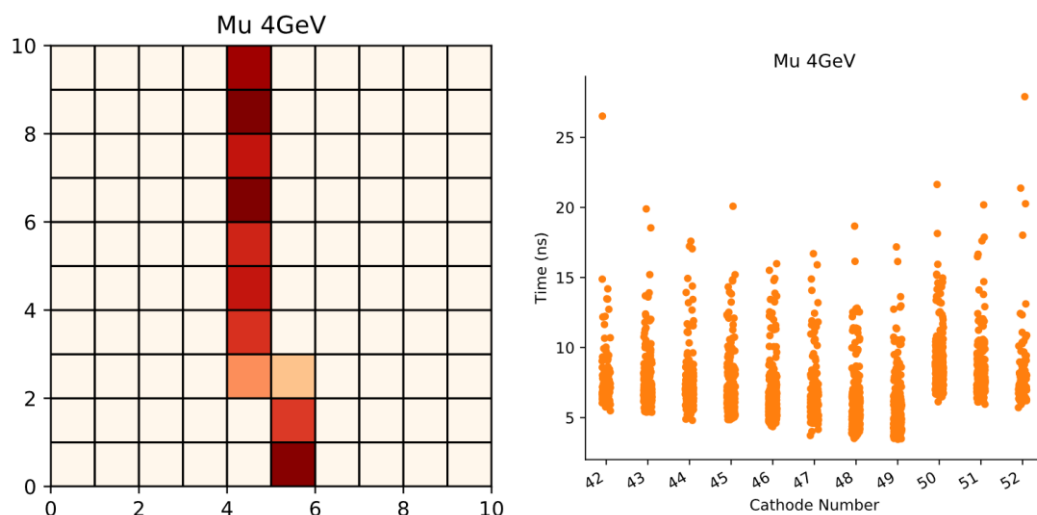


۳-۱- همبسته کردن داده‌های زمانی و توپولوژی هر رویداد

با مهندسی ویژگی برخی از داده‌ها به هم متصل شده‌اند. به این ترتیب رفتار زمانی و رفتار توپولوژی با هم همبسته شده اند. در شکل ۷ نمونه‌ای از یک تصویر که رفتار زمانی و رفتار توپولوژی یک رویداد به صورت یک تصویر واحد ذخیره شده است نمایش داده شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

این روش تولید بانک داده با سرعت و دقت بالا می‌تواند داده‌های مورد نیاز برای آموزش مدل را فراهم کرده و برای انواع آشکارسازهای قطعه‌بندی شده دوبعدی و حتی ۳ بعدی (ووکسل^{۴۳}) مورد استفاده قرار گیرد. با طراحی‌ای که روی خروجی آشکارساز صورت گرفته است، رهیافت تبعیض شکل پالس برای تشخیص و طبقه‌بندی ذرات با هوش مصنوعی و مشخصا یادگیری عمیق قابل انجام است. بعلاوه با این روش جمع‌آوری و ذخیره داده به صورت بانک داده هیچ‌گونه اطلاعاتی از رویدادها از دست نمی‌روند و همبستگی داده‌ها و اطلاعات مفیدی که می‌تواند در تشخیص ذرات موثر باشد در بانک داده ذخیره شده است. همچنین امکان مرتبط‌سازی داده‌های تصویری با داده‌های ساختارمند (جدول بندی شده (Tabular data)) مهندسی شده برای آموزش بهتر مدل‌ها وجود دارد.



شکل (۷) جمع کردن اطلاعات مربوط به رفتار زمانی و توپولوژی از یک رویداد نوعی میون عبوری با انرژی ۴ GeV در یک تصویر واحد.

۵- مراجع:

- [۱] Kohn, Samuel, et al. "Deep learning with raw data from Daya Bay." Journal of Physics: Conference Series. Vol. ۸۹۸. No. ۷. IOP Publishing, ۲۰۱۷.
- [۲] Conceição, R., et al. "Muon identification in a compact single-layered water Cherenkov detector and gamma/hadron discrimination using machine learning techniques." The European Physical Journal C ۸۱, ۶ (۲۰۲۱): ۱-۹.
- [۳] Loh, Chang-Wei, et al. "Deep learning the effects of photon sensors on the event reconstruction performance in an antineutrino detector." Advances in High Energy Physics ۲۰۱۸, ۱ (۲۰۱۸): ۷۰۲۴۳۰۹.

^{۴۳} Voxel

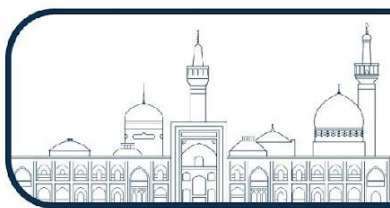


[۴] Griffiths, Jack, et al. "Pulse shape discrimination and exploration of scintillation signals using convolutional neural networks." Machine Learning: Science and Technology ۱,۴ (۲۰۲۰): ۰۴۵۰۲۲.

[۵] Li, Zi-Yuan, et al. "Improvement of machine learning-based vertex reconstruction for large liquid scintillator detectors with multiple types of PMTs." Nuclear Science and Techniques ۳۳,۷ (۲۰۲۲): ۹۳.

[۶] Karimi, Javad, Faezeh Rahmani, and S. Bijan Jia. "Improving the detection efficiency of IRAND based on machine learning." Computer Physics Communications ۲۹۱ (۲۰۲۳): ۱۰۸۸۳۳.

[۷] Karimi, Javad; Rahmani, Faezeh; jia, bijan (۲۰۲۵), "IRAND-Sim Deep learning", Mendeley Data, V۱, doi: ۱۰.۱۷۶۳۲/pg۷m۵f۴۸۸s.۱



رشد تک بلورهای CsI(Tl) و CsI(Tl, Eu) و بررسی اثر یوروپیم به عنوان آلاینده مضاعف (کد

مقاله : ۱۱۸۲)

قنبری، رضا - رادمنش، سید محمد علی - فری پور، حیدر

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

چکیده:

افزایش عملکرد بلورها برای کاربردهای ابزار دقیق هسته‌ای، تصویربرداری پزشکی و اندازه‌گیری تابش در زمینه‌های صنعتی بسیار مهم است. در راستای رسیدن به این هدف، سامانه‌ی رشد بلوری طراحی و ساخته شد، و تک بلورهای CsI(Tl) و CsI(Tl, Eu) با استفاده از روش معمول چوکراسکی رشد داده شد. غلظت تالیوم (Tl) و یوروپیم (Eu) در بلورهای رشد یافته به صورت کمی تعیین شد. داده‌ها افت غلظت تالیوم، و بالتبع آن کاهش بازده نوری را با افزایش زمان رشد و ارتفاع بلور نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که شیب کاهش غلظت تالیوم در بلور با آلاینده مضاعف نسبت به بلور اول کاهش یافته است. علاوه بر این، با افزایش یوروپیم به عنوان آلاینده مضاعف، بازده نوری بلور به طور متوسط حدود ۱۴.۵٪ افزایش یافت، که اثر فعالسازی مضاعف این آلاینده را در این ترکیب نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه و بهینه‌سازی مواد سوسوزن در کاربردهای مختلف کمک کند.

Growth of single crystals of CsI(Tl) and CsI(Tl, Eu) and investigating the effect of europium as a co-dopant

Ghanbari, Reza, Radmanesh, Seyed Mohammad Ali, Faripour, Heidar

۱. Photons and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

Abstract:

Increasing the performance of crystals is important for applications in nuclear instrumentation, medical imaging, and radiation measurement in industrial fields. In order to achieve this goal, a crystal growth system was designed and single crystals of CsI(Tl) and CsI(Tl, Eu) were grown using the usual Czochralski method. The concentrations of thallium (Tl) and europium (Eu) in the grown crystals were quantitatively determined. The data show a decrease in thallium concentration, and consequently a decrease in optical efficiency, with increasing growth time and crystal height. It is also observed that the slope of the decrease in thallium concentration in the co-doped crystal is reduced compared to the first crystal. In addition, with the addition of europium as a co-dopant, the optical efficiency of the crystal increased by an average of about ۱۴.۵%, which indicates the co-activation effect of this dopant in this composition. The results of this study can help in the development and optimization of scintillating materials in various applications.

Key words: single crystals of CsI(Tl) and CsI(Tl, Eu), scintillating materials, light yield



۱ - مقدمه:

کریستال‌های سوسوزن مواد کلیدی در تشخیص پرتوهای یونیزان، به‌ویژه در زمینه‌های پزشکی هسته‌ای و فیزیک ذرات هستند. از جمله مهمترین و پرکاربردترین مواد سوسوزن، یدید سدیم (NaI) و یدید سزیم (CsI) آلاینش شده با عناصر لانتانید همچون تالیوم (Tl) می‌باشد که توانایی بالایی در تولید نور سوسوزن از خود نشان می‌دهند، و بنابراین عملکرد عالی در تشخیص اشعه گاما نشان می‌دهد [۱].

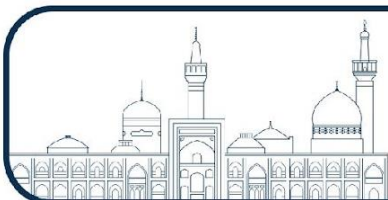
یدید سزیم آلاینش شده با تالیوم (CsI:Tl)، یکی از کارآمدترین سوسوزن‌هایی است که تاکنون برای تصویربرداری رادیولوژیکی ساخته شده است. در حالی که طیف گسترده‌ای از مواد جدید در حال حاضر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند، CsI:Tl به دلیل خواص ویژه‌ای همچون، هزینه کم و در دسترس بودن آسان، راندمان تبدیل بسیار بالا در بین سوسوزن‌های شناخته شده (۶۴۰۰۰ فوتون/MeV) [۲]، واپاشی اولیه سریع (۶۸۰ نانوثانیه) و انتشار در محدوده مرئی (۵۴۰ نانومتر) هنوز در کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های تصویربرداری هسته‌ای و پزشکی به عنوان یک انتخاب اصلی باقی مانده است [۳].

با وجود مزایای روشن CsI:Tl، استفاده از آن در برنامه‌های تصویربرداری سریع توسط یک ویژگی مشخصه ناخوشایند مواجه می‌شود: پس‌درخشش^{۴۴} در فروپاشی سوسوزنی آن. این پدیده باعث انباشته شدن پالس در نرخ‌های بالای شمارش شده و بنابراین کاهش وضوح تصویربرداری مداوم می‌شود. با این حال، اخیراً محققان نشان دادند که سینتیک پس‌درخشش را می‌توان به طور قابل‌توجهی از طریق گنجاندن افزودنی‌های اصلاح‌کننده مناسب در شبکه تغییر داد [۳، ۴]. از بین تمام افزودنی‌های مورد بررسی برای این منظور، امیدوارکننده‌ترین دسته عناصر کاتیون‌های دو ظرفیتی بودند که قادر به ورود به شبکه در موقعیت‌های Cs^+ بودند [۵، ۶]. Eu^{2+} یکی از معدود یون‌هایی است که به طور مؤثر در شبکه CsI می‌تواند به صورت خودبه‌خودی منتشر شود [۷]. در مطالعات گوناگونی اثر Eu^{2+} چه به صورت آلاینده و چه به عنوان آلاینده مضاعف به منظور بررسی اثر مقدار آلاینش، و تاثیر آن در پس‌درخشش و تغییر در بازده نوری (نرخ شمارش) مورد بررسی قرار گرفته است و به طور کلی تاثیر مثبتی در افزایش کارایی بلور CsI (به ویژه در حالت آلاینده مضاعف) نشان داده است [۵، ۶]. کریستال‌های CsI عموماً با روش چوکراسکی^{۴۵} رشد داده می‌شوند. روش چوکراسکی به دلیل برتری فنی آن برای رشد بلورهای بزرگ با کیفیت بالا، برای رشد بسیاری از انواع تک بلورهای هالیدها استفاده شده است [۱].

در این مقاله، بلورهای سوسوزن CsI آلاینده شده با تالیوم (به عنوان آلاینده) و یوروپیم (به عنوان آلاینده مضاعف) به روش چوکراسکی رشد داده شده و خواص فیزیکی و نوری آن و تأثیر غلظت مواد آلاینده بر کارایی سوسوزن و سایر ویژگی‌های آن‌ها بررسی می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه و بهینه‌سازی مواد سوسوزن جدید که کاربردهای گسترده‌ای در تجهیزات پزشکی، صنعتی و فیزیک بنیادی دارند، کمک کند.

^{۴۴} Afterglow

^{۴۵} Czochralski



۲ - روش کار:

۲-۱- رشد بلورها

در این کار دو بلور CsI (Tl, Eu) و CsI (Tl) با روش معمولی چوکراسکی و با استفاده از یک سامانه رشد بلور (خود ساخته شده) در آزمایشگاه رشد بلور انجام شد. فرآیند رشد بلورها در ادامه شرح داده می‌شود. در مرحله اول، ماده اولیه مورد استفاده که پودر CsI با درجه خلوص ۹۹.۸٪ (شرکت مرک^{۴۶}) در بوته‌ای استوانه‌ای به قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر از جنس کوارتز قرار داده شد و عملیات خلاء و گرمایش به طور همزمان روی بوته انجام شد. عملیات حرارتی در یک کوره مقاومتی انجام شده و دما با نرخ ۲۵ درجه سانتیگراد در دقیقه به ۴۵۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد. برای به حداقل رساندن OH ، فشار محفظه در زمانی در حدود ۲۰ ساعت به حدود ۰.۰۰۱ تور رسانده شد. پس از قطع خلاء، گاز آرگون به داخل محفظه تزریق و دمای بوته تا ذوب شدن مواد افزایش یافت. پس از پایدار شدن کامل مذاب، بلور دانه به سطح مذاب مماس شده و بعد از رسیدن به تعادل دینامیکی در سطح مشترک مذاب/جامد، بلور با سرعت ۳ میلی‌متر در ساعت همراه با چرخش ۳۰ دور در دقیقه (در جهت عقربه‌های ساعت) کشیده می‌شود. همچنین، بوته نیز با سرعت ۵ دور در دقیقه (در خلاف جهت عقربه‌های ساعت) چرخش داشت. برای جلوگیری از ورود ناخالصی‌ها به این بلور، فرآیند رشد تا زمانی که یک سوم مذاب در بوته باقی بماند ادامه می‌یابد. بلور به دست آمده به عنوان ماده اولیه در رشد بعدی استفاده می‌شود.

در مرحله بعد، ۴۵۰ گرم از بلور CsI به دست آمده از مرحله قبل، با مقداری پودر تالیوم یدید با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ (شرکت آلدريج^{۴۷}) مخلوط شد به طوری که میزان آلایندگی ۰/۲٪ مولی بود. رشد بلور CsI (Tl) در این مرحله، با سرعت کشش بلور دانه ۲ میلی‌متر بر ساعت و سرعت چرخش ۱۲ دور در دقیقه انجام شد. بلور CsI (Tl, Eu) نیز با همین شرایط و ۰/۳٪ مولی پودر یدید یوروپیم به عنوان آلایندگی مضاعف، رشد داده شد. بلورهای به دست آمده به قطر تقریبی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۹۵ میلی‌متر، در مدت زمان ۳۳ ساعت به دست آمد که در شکل ۱ (بالا) نشان داده شده است.

۲-۲- مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری‌ها

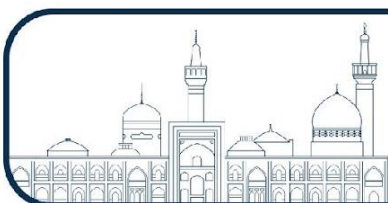
اندازه‌گیری خاصیت سوسوزن پس از برش بلور (عمود بر جهت رشد) به طول ۲۰ میلی‌متر به منظور اندازه‌گیری غلظت تالیوم و یوروپیم در امتداد بلور رشد داده شده انجام شد. این کار پس از صیقل سطوح بلورها به صورت اپتیکی، با دستگاه جذب اتمی (مدل پرکین المر-اپتیما^{۴۸} ۲۱۰۰) انجام شد. بلورها به مولتی‌پلایر نوری (مدل FEU-۳۱، روسیه) جفت شدند. نرخ شمارش فوتون‌ها از بلورها با پرتوهای همسو شده از منبع کبالت ۶۰ با شدت ۲ میلی‌کوری^{۴۹} که در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از سطح بلور نمونه قرار داشت اندازه‌گیری شد. سامانه الکترونیکی هسته‌ای از یک SCA تخصصی (NSTRI، تهران، ایران) متشکل از پیش

^{۴۶} Merck

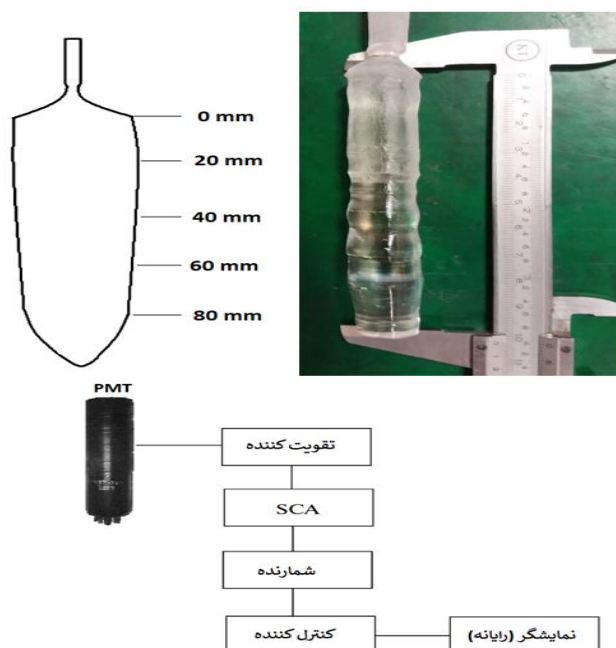
^{۴۷} Aldrich

^{۴۸} PerkinElmer-Optima ۲۱۰۰

^{۴۹} Co-۶۰ (۲ mCi)



تقویت کننده، تقویت کننده، ولتاژ بالا (بجینگ هاماماتسو، چین^{۵۰}) و یک سیستم جمع‌آوری داده‌ها تشکیل شده است (شکل ۱ (پایین)). سپس مشخصه قطعه بلوری با بالاترین سرعت شمارش و غلظت مشخص تالیوم و یورانیوم با طیف‌سنجی درخشندگی (مدل کری الپس^{۵۱}) ارزیابی شد.



شکل (۱) (بالا) نمایی از بلور رشد داده شده و بخش‌های مختلف برش داده شده آن، (پایین) طرحواره‌ای از سامانه استحصال داده‌ها از بلورها همراه PMT.

۳- بحث و نتیجه‌گیری:

به منظور مقایسه هر قسمت از بلور رشد یافته، غلظت تالیوم در امتداد بلور CsI(Tl) و غلظت تالیوم و یورانیوم در امتداد بلور CsI(Tl, Eu) با سیستم جذب اتمی اندازه‌گیری شد. نتایج این مشخصه‌یابی به ترتیب در جدول ۱ ارائه و در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است.

جدول ۱: غلظت تالیوم در هر قسمت از بلورهای CsI(Tl, Eu) و CsI(Tl) رشد یافته و بازده نوری آن [۳]

بلور CsI(Tl)			
CPS	غلظت Tl (%mol)	طول (mm)	
۱۹۰۰۰	۰.۱۱	۰-۲۰	
۱۳۰۰۰	۰.۰۸۳	۲۰-۴۰	

^{۵۰} CC۲۲۸-۰۱Y BEIJING Hamamatsu, China

^{۵۱} Carry Eclipse



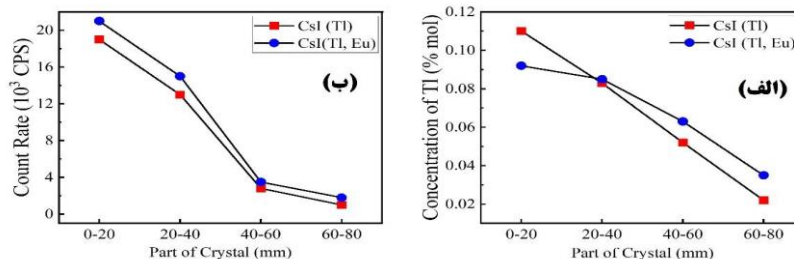
۲۸۰۰	۰.۰۵۲	۴۰-۶۰	
۱۰۰۰	۰.۰۲۲	۶۰-۸۰	
بلور (CsI(Tl, Eu)			
CPS	غلظت Eu (%mol)	غلظت Tl (%mol)	طول (mm)
۲۱۰۰۰	۰.۰۲	۰.۰۹۲	۰-۲۰
۱۵۰۰۰	۰.۰۲	۰.۰۸۵	۲۰-۴۰
۳۵۰۰	۰.۰۲	۰.۰۶۳	۴۰-۶۰
۱۸۰۰	۰.۰۲	۰.۰۳۵	۶۰-۸۰

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تالیم در بلور رشد یافته یکنواخت توزیع نشده است و با گذشت زمان و افزایش طول بلور، غلظت ناخالصی کاهش می‌یابد. این رفتار به پارامترهای مختلفی وابسته است که می‌توان از طریق رابطه‌ی ضریب توزیع موثر ناخالصی در بلور، که موسوم به معادله BPS^{۵۲} است، مورد بررسی قرار گیرد [۸]:

(۱)

$$K_e = \frac{K.}{K. + (1-K.)e^{-\left(\frac{v}{D}\right)\delta}}$$

که در آن $K.$ ضریب توزیع ناخالصی در فصل مشترک بلور/مذاب است و به صورت نسبت غلظت ناخالصی در جامد (بلور) به غلظت ناخالصی در مذاب $K. = \frac{C_S}{C_L}$ تعریف می‌شود. همچنین، در این رابطه v سرعت کشیدن بلور، δ ضخامت لایه‌ای از فصل مشترک بلور/مذاب است که در آنجا نسبت ناخالصی به سایر نقاط مذاب بیشتر باشد، و D نیز ضریب نفوذ ناخالصی در مذاب است. البته باید توجه کرد که این رابطه برای بلورهایی که قطر آنها در حدود یک سوم قطر بوته رشد یابد می‌تواند صادق باشد. با توجه به اینکه مقدار تالیم موجود در بلور CsI(Tl) در ابتدای رشد حدود ۰.۱۱٪ مولی بوده، بنابراین برای این بلور $K. \approx ۰.۵۵$ می‌باشد. این درحالی است که در بلور CsI(Tl, Eu) این ضریب در ابتدای رشد حدود ۰.۴۶ بدس می‌آید. همچنین مشاهده می‌شود که شیب کاهش غلظت تالیم در بلور با آلایش مضاعف نیز نسبت به بلور اول کاهش یافته است. به دلیل غلظت بسیار کم یورانیوم نیز، غلظت آن در بلور CsI(Tl, Eu) تقریباً یکنواخت بوده است.

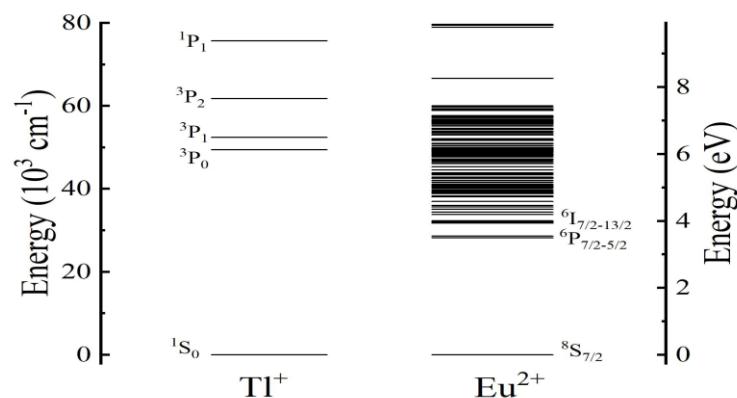


شکل (۲) (الف) غلظت تالیم، و (ب) نرخ شمارش در بخش‌های مختلف بلورهای رشد داده شده

^{۵۲} Burton, Prim, and Slichter



همچنین، نتایج اندازه گیری بازده نوری بلورها که با منبع رادیواکتیو کبالت ۶۰ انجام شده بود، در جدول ۱ و شکل ۲ (ب) نمایش داده شده است. داده ها افت بازده نوری را با کاهش غلظت تالیم در بلور نشان می‌دهد. همچنین افزایش متوسط حدود ۱۴.۵٪ بازده نوری را با افزایش یوروپیم به عنوان آلاینده مضاعف در بلور نشان می‌دهد. این پدیده نقش فعالسازی مضاعف یوروپیم را نشان می‌دهد که با توجه ساختار نواری یون‌های تالیم و یوروپیم که در شکل ۳ نشان داده شده است قابل درک است.



شکل (۳) نمایش ترازهای انرژی یون‌های تالیم و یوروپیم [۹]

فرایند پس‌درخشش در CsI(Tl) می‌تواند به یونیزاسیون حرارتی الکترون‌های به دام افتاده (Tl^+) و به دنبال آن بازترکیب تابشی با حفره‌های به دام افتاده [$V_{KA}(Tl^+)$] نسبت داده شود. به این ترتیب، آرایش مضاعف با یوروپیم تله‌های الکترونی عمیق‌تری را با قله‌های درخشش دمای اتاق معرفی می‌کند که به طور موثر الکترون‌ها را از تله‌های کم عمق مرتبط با تالیم از بین می‌برد، بنابراین پس‌درخشش از آن در بازه زمانی ده‌ها میلی‌ثانیه متوقف می‌شود، اما پس‌درخشش در مقیاس زمانی طولانی‌تر ثانیه و دقیقه افزایش می‌یابد [۶]. بنابراین موجب افزایش بازده نوری بلور می‌شود.

۴- مراجع:

- [۱] Faripour, H., R.G. Peyvandi, and S.Z. Islami rad, Evaluation of thallium quantity through grown NaI(Tl) crystal by Czochralski method. Crystallography Reports, ۲۰۱۴. ۵۹(۷): p. ۱۱۱۸-۱۱۲۰.
- [۲] Bartram, R.H. and A. Lempicki, Efficiency of electron-hole pair production in scintillators. Journal of Luminescence, ۱۹۹۶. ۶۸(۵): p. ۲۲۵-۲۴۰.
- [۳] Brecher, C., et al., Suppression of afterglow in CsI:Tl by codoping with Eu^{2+} —I: Experimental. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۰۶. ۵۵۸(۲): p. ۴۵۰-۴۵۷.
- [۴] Brecher, C., et al., Time-resolved studies of the nonexponential decay of CsI (Tl) after short-pulse X-ray excitation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۰۵. ۵۳۷(۱-۲): p. ۱۱۷-۱۲۴.



[۵] Kappers, L.A., et al., Effect of Eu^{2+} concentration on afterglow suppression in CsI:Tl, Eu. Radiation Measurements, ۲۰۰۷. ۴۲(۴): p. ۵۳۷-۵۴۰.

[۶] Shiran, N.V., et al., Eu Doped and Eu, Tl Co-Doped NaI Scintillators. IEEE Transactions on Nuclear Science, ۲۰۱۰. ۵۷(۳): p. ۱۲۳۳-۱۲۳۵.

[۷] Seo, H.J., et al., Luminescence properties of a CsI crystal doped with Eu^{2+} ions. Journal of Alloys and Compounds, ۲۰۰۲. ۳۴۴(۱): p. ۲۶۸-۲۷۱.

[۸] فریپور، حیدر، مقدمه ای بر رشد بلور از مذاب، انتشارات نص، ۱۳۹۰

[۹] Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (۲۰۲۴). NIST Atomic Spectra Database (ver. ۵,۱۲), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>.



ارزیابی پرتوگیری شغلی پرتوکاران ایران: یک تحلیل دزیمتری گذشته‌نگر پنج‌ساله (کد مقاله : ۱۱۸۳)

جوهری، نیلوفر^۱ - فقیهی، رضا^{۱،۲} - راکب، زهرا^۱ - سرشوق، سمیرا^۳ - نظری جهرمی، محمد امین^۲ - لطفعلی زاده، فاطمه^۴ - کریمی پورفرد، مهرنوش^۱ - صادقی، محمدحسین^۱ - صدیقه، سینا^{۱،۲*}

۱. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای
۲. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات تابش
۳. دانشگاه جهرم، دانشکده مهندسی
۴. شرکت سنجش پرتومهرآرشید، شیراز

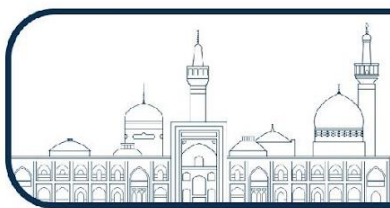
چکیده:

در این مقاله، ارزیابی مختصری از پرتوگیری شغلی پرتوکاران در ایران، بر اساس داده‌های دزیمتری فردی طی پنج سال، ارائه می‌شود. این داده‌ها با استفاده از دزیمتر فیلم بج گردآوری شده است. هدف از این مطالعه، بررسی سوابق دز دریافتی در مراکز مختلف پزشکی و صنعتی، از جمله رادیولوژی تشخیصی، پزشکی هسته‌ای، رادیولوژی مداخله‌ای و رادیوگرافی صنعتی بود. تأکید اصلی بر شناسایی روندهای دز فردی، بررسی عوامل مؤثر بر توزیع دز، و ارزیابی رعایت حدود دز ملی و بین‌المللی است. در این بررسی گذشته‌نگر، داده‌های فیلم‌های برگشتی در دوره‌های دوماه متوالی و طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها تحلیل شد. نتایج توصیفی نشان می‌دهد که اغلب پرتوکاران، دزهای بسیار کم یا زیر حد تشخیصی دریافت کرده‌اند که بیانگر اجرای مؤثر پروتکل‌های حفاظت در برابر پرتو است. با این حال، در برخی زیرگروه‌ها، به‌ویژه کارکنان پزشکی هسته‌ای که با چشمه‌های باز سروکار دارند و نیز در رادیولوژی مداخله‌ای، میانگین دز بالاتر گزارش شد. علاوه بر این، مواردی همچون استفاده نادرست از بج، آسیب فیلم و خطاهای کاربری، دقت برآورد دز را تحت تأثیر قرار داد. یافته‌ها نشان می‌دهد، هرچند بیشتر اندازه‌گیری‌ها در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند، اما ارتقای آموزش‌ها، تقویت پایش و پیروی دقیق‌تر از دستورالعمل‌های حفاظت پرتویی و افزایش فراوانی بازرسی‌های کیفی می‌تواند عدم قطعیت‌ها را کاهش دهد و دزها را در سطح اصل *ALARA* نگه دارد. پیشنهاد می‌شود برای گسترش دقت دزیمتری، از دزیمترهای دیجیتال نیز بهره گرفته شود. این مطالعه، اهمیت پایش پیوسته و استراتژی‌های حفاظتی هدفمند را برای حفظ ایمنی پرتوکاران در ایران برجسته می‌کند.

کلمات کلیدی: دزیمتری شغلی، دزیمتر فیلم بج، پرتوکاران، پزشکی هسته‌ای، ارزیابی دز، اصل *ALARA*

Occupational Exposure Assessment of Iranian Radiation Workers: A Five-Year Retrospective Dosimetric Analysis

Johari, Niloufar ^۱, Faghihi, Reza ^{۱،۲}, Rakeb, Zahra ^۱, Sarshouq, Samira ^۳, Nazari Jahromi, Mohammad Amin ^۲, Lotfalizadeh, Fatemeh ^۴, Karimipourfard, Mehrnosh ^۱, Sadeghi, Mohammad Hossein ^۱, Sedigheh, Sina ^{۱،۲*}



۱. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Nuclear Engineering
Department

۲. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Radiation Research Center

۳. Jahrom University, Faculty of Engineering

۴. Sanjesh Parto Mehr Arshida Company, Shiraz

Abstract:

This paper presents a concise assessment of occupational radiation exposure among Iranian radiation workers, based on five years of individual dosimetry data obtained from film badge measurements. The study aimed to evaluate dose records in various medical and industrial settings, including radiology, nuclear medicine, and interventional cardiology, as well as industrial radiography. Emphasis was placed on identifying trends in personal doses, exploring factors influencing variations in dose distribution, and determining compliance with national and international dose limits. A retrospective analysis was conducted on returned film badges over consecutive bi-monthly monitoring periods, covering a broad range of activities. The descriptive statistics show that most radiation workers received minimal or below-threshold doses, reflecting effective implementation of radiation protection protocols. However, specific subgroups, notably nuclear medicine staff handling unsealed sources and interventional radiology personnel, exhibited higher mean doses than other groups. Inconsistent badge use, film damage, and errors in handling also influenced the accuracy of dose estimations. Findings indicate that, while the majority of dose records remain within permissible levels, enhanced training, stricter compliance measures, and more frequent quality control checks could further reduce uncertainties and maintain doses at As Low As Reasonably Achievable (ALARA) levels. Future recommendations include expanding digital dosimetry, reinforcing occupational training, and extending research to capture a larger volume of data from underrepresented centers. Overall, the study underscores the importance of continuous monitoring and targeted protective strategies to safeguard radiation workers in Iran.)

Key words: Occupational Dosimetry, Film Badge, Radiation Workers, Nuclear Medicine, Dose Assessment, ALARA

۱ - مقدمه:

پرتوگیری شغلی با پرتوهای یون‌ساز از دیرباز در محیط‌های پزشکی و صنعتی مورد توجه بوده است. از زمان کشف اشعه ایکس و رادیواکتیویته، بهره‌برداری از مزایای پرتوهای یون‌ساز همواره با ضرورت حفاظت از کارکنان و عموم مردم در برابر اثرات بالقوه زیان‌بار آن همراه بوده است. بنا بر گزارش‌های کو و همکاران [۱] و اسپچولتز و همکاران [۲]، پایش نظام‌مند دُزهای دریافتی پرتوکاران، یکی از ارکان کلیدی حفاظت پرتویی محسوب می‌شود و امکان ارزیابی رعایت حدود دُز و بهبود سیاست‌های ایمنی را فراهم می‌آورد.

در ایران، رشد سریع کاربردهای تشخیصی و درمانی، به‌ویژه در تصویربرداری پزشکی و پزشکی هسته‌ای، موجب افزایش قابل توجه شمار افرادی شده است که به‌صورت شغلی با تابش‌های یون‌ساز مواجه‌اند. بر اساس مقررات ملی مبتنی بر توصیه‌های بین‌المللی



(کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه [ICRP] [۳] و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [IAEA] [۴])، پرتوگیری شغلی باید در محدوده‌های تعیین‌شده کنترل شود تا خطرات بهداشتی کاهش یابد. روش متداول پایش فردی، دزیمتری فیلم‌بج است که در آن از فیلم حساس به پرتو در درون یک بج (Badge) حاوی فیلترهای فلزی استفاده می‌شود. این فیلترها به تفکیک انرژی و نوع پرتو (اشعه ایکس، گاما یا بتا) کمک می‌کنند [۵،۶]. در برخی موارد، به‌ویژه در پزشکی هسته‌ای، از دزیمتری انگشتی نیز برای سنجش دُز اندام (پوست) استفاده می‌شود.

سه اصل مهم در حفاظت در برابر اشعه عبارت‌اند از توجیه کاربرد، بهینه‌سازی حفاظت (اصل ALARA) و رعایت حدود دُز [۳،۷]. بر این اساس، برای کارکنان شاغل در معرض پرتو، حد دُز مؤثر متوسط ۲۰ میلی‌سیورت در سال طی یک دوره پنج‌ساله (حداکثر ۵۰ میلی‌سیورت در سال) توصیه می‌شود تا خطر اثرات قطعی محدود و احتمال اثرات احتمالی کنترل گردد [۳]. با توجه به عدم قطعیت در برآورد اثرات دُزهای پایین، اتخاذ رویکردی محافظه‌کارانه همواره مدنظر قرار می‌گیرد.

هرچند دزیمتری فیلم‌بج متداول و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، عوامل محیطی نظیر گرما و رطوبت یا کاربرد نادرست (برای مثال قرار دادن بج زیر روپوش سربی) ممکن است به خطا در اندازه‌گیری دُز منجر شود [۲،۸]. همچنین، در بخش‌هایی مانند پزشکی هسته‌ای، آلودگی فیلم با رادیوداروها می‌تواند منجر به انحراف در قرائت گردد. باین‌حال، گردآوری حجم گسترده‌ای از سوابق دُز در طول زمان، فرصتی مناسب برای تشخیص الگوهای پرتوگیری، شناسایی گروه‌های پرخطر (مانند رادیولوژی مداخله‌ای) و ارزیابی میزان انطباق با استانداردهای ملی و بین‌المللی فراهم می‌آورد.

در این مطالعه، داده‌های پنج‌ساله دزیمتری فیلم‌بج مراکز متعدد در ایران (شامل مراکز پزشکی و صنعتی) گردآوری شده و با تمرکز بر دُز کلی و دُز پوست، توزیع دُز و موارد «زیر آستانه» (کمتر از ۰.۵۰ میلی‌سیورت) تحلیل می‌شود. همچنین، به موضوعاتی مانند کاربرد نامناسب بج یا بروز ناهنجاری‌های دزیمتری پرداخته خواهد شد. هدف اصلی، توصیف روند دُزهای شغلی، برجسته‌کردن مشکلات تکرارشونده و ارائه راهکارهایی در راستای بهبود پایش شغلی و رعایت اصل ALARA است.

۲ - روش کار:

این پژوهش، مطالعه‌ای گذشته‌نگر است که در آن داده‌های دزیمتری پنج‌ساله، به‌صورت منظم در دوره‌های دوماهه، از گروه‌های مختلف پرتوکار در ایران گردآوری شده است. این گروه‌ها شامل کارکنان بخش‌های گوناگون پزشکی (تشخیصی و درمانی) تا صنایع دارای منابع پرتوزا هستند. از جمله می‌توان به رادیولوژیست‌ها، تکنیسین‌های رادیولوژی، کارکنان پزشکی هسته‌ای، متخصصان رادیولوژی مداخله‌ای و پرتوکاران صنعتی فعال در حوزه آزمون‌های غیرمخرب و کالیبراسیون اشاره کرد.

۲-۱- جمع‌آوری داده‌ها

در هر دوره دوماهه، به هر پرتوکار یک دزیمتر فیلم‌بج تحویل داده می‌شد و پس از حدود دو ماه استفاده، بج‌ها برای قرائت دُز به مرکز خدمات دزیمتری بازگردانده می‌شدند. در آزمایشگاه، فیلم‌ها ظاهر شده و دانسیته‌ی نوری آن‌ها با دانسیتومتر کالیبره‌شده اندازه‌گیری می‌گردید. سپس با لحاظ فیلترهای موجود در بج و کالیبراسیون‌های مرجع، مقدار دُز معادل (برحسب میلی‌سیورت) تعیین می‌شد. اندازه‌گیری‌های کمتر از ۰.۵۰ میلی‌سیورت، به‌عنوان «کمتر از ۰.۵۰» ثبت می‌شدند.



از آنجا که داده‌ها از مراکز متعدد (دولتی و خصوصی) و همچنین بخش‌های صنعتی جمع‌آوری می‌شد، تلاش گردید پوشش آماری گسترده‌ای فراهم گردد. باین‌حال، ممکن است برخی مراکز خصوصی کوچک یا صنایع دورافتاده در این شبکه‌ی پایش کاملاً تحت پوشش قرار نگرفته باشند. از این‌رو، پایش گسترده‌تر این گروه‌ها در مطالعات آتی مدنظر قرار خواهد گرفت.

در این پژوهش، متغیرهای کلیدی شامل دُز کل بدن (10 Hp) و دُز پوست (0.07 Hp) بوده است. در حوزه‌ی پزشکی هسته‌ای، توجه ویژه‌ای به دُز پوست صورت گرفت، زیرا کارکنان به‌صورت مستقیم با رادیونوکلیدهای گسیل‌کننده‌ی پرتو بتا در تماس هستند.

برای اطمینان از صحت داده‌ها، موارد زیر در نظر گرفته شد:

بررسی آسیب یا آلودگی فیلم: چنانچه فیلم دچار پارگی لفافه، آلودگی قابل توجه با رادیودارو یا قرارگیری نادرست (نظیر زیر روپوش سربی) بود، داده‌ی مربوطه پس از ثبت در فهرست موارد مخدوش، از تحلیل‌های آماری اصلی حذف می‌شد.

ارزیابی موارد با دُز بسیار بالا (Outliers): چنانچه دُز گزارش‌شده اختلاف چشمگیری با میانگین کل داشت، علت آن (از جمله خطای کاربری، رویداد تک‌مرحله‌ای یا آلودگی ناگهانی) بررسی می‌گردید تا اطمینان حاصل شود روندی دائمی یا تکرارشونده نیست.

تفکیک گروه‌های کاری: داده‌ها براساس نوع فعالیت (رادیولوژی تشخیصی، آنژیوگرافی، پزشکی هسته‌ای، آزمون‌های صنعتی و غیره) دسته‌بندی شد تا گروه‌های با ریسک بالاتر یا موارد خاص آسان‌تر شناسایی شوند.

۲-۲- تحلیل آماری

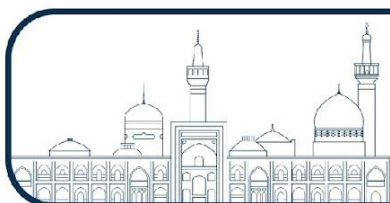
در گام نخست، آمار توصیفی مانند میانگین، میانه و انحراف معیار برای دُز کل بدن و دُز پوست محاسبه شد. همچنین درصد موارد زیر آستانه، حداکثر دُزهای دریافتی و هرگونه تجاوز از حدود مجاز ملی و بین‌المللی بررسی شد. مقایسه‌ی گروهی میان انواع فعالیت‌ها نیز صورت گرفت تا روند احتمالی افزایش یا کاهش دُز در دوره‌های دوماهه مشخص شود. برای محاسبه و مصورسازی نتایج (رسم نمودارها و جداول)، از نرم‌افزارهای آماری رایج استفاده گردید. در مواردی که داده‌ای بالاتر از حدود توصیه‌شده (20 mSv در سال یا 50 mSv در یک سال منفرد) گزارش می‌شد، علت‌یابی دقیق‌تری انجام می‌گرفت.

۳- نتایج:

طی پنج سال، داده‌های مربوط به ۹۳۲۵ ورودی در دوره‌های مختلف مراکز ثبت شد (جدول ۱). اغلب مراکز دارای رادیولوژی معمولی بودند ($n = 6470$) و پس از آن، کاردیولوژی مداخله‌ای (آنژیوگرافی) و پزشکی هسته‌ای قرار داشتند. تعداد اندکی از موارد نیز شامل کاربردهای غیرپزشکی نظیر رادیولوژی صنعتی یا کالیبراسیون‌ها بودند.

جدول ۱: نوع فعالیت در مراکز

تعداد مراکز	نوع فعالیت
۷۰۷	رادیوتراپی/پراکری تراپی
۱۱۷۳	آنژیوگرافی (قلب)



پزشکی هسته‌ای	۴۴۸
رادیولوژی عمومی	۶۴۷۰
سایر (مجموع)	۲۵۲۷ (تقریبی)
مجموع	۹۳۲۵

۳-۱- حداکثر دزها و موارد بالاتر از آستانه

در طول یک دوره پنج‌ساله، داده‌های دز متوسط و بیشینه هر دو ماه یک بار جمع‌آوری شدند. جدول ۲، بیشترین دز ثبت‌شده در هر دوره و تعداد افرادی را که از ۰.۵۰ میلی‌سیورت (حداقل دز قابل تشخیص) فراتر رفتند، نشان می‌دهد. اگرچه گاهی اوقات بیشینه دز از ۵۰ میلی‌سیورت بالاتر می‌رفت (برای مثال ۳۲.۵۴ میلی‌سیورت در دوره ۳۵)، اما بررسی‌های دقیق‌تر اغلب نشان داد که این موارد رویدادهایی تک‌زمانی بوده‌اند، مانند قرار گرفتن تصادفی در معرض دزهای بالا در رادیولوژی صنعتی یا استفاده نادرست از نشانگرها. هیچ الگوی تکراری که حاکی از تابش اضافی مستمر باشد، مشاهده نشد.

جدول ۲: بیشترین دز و تعداد پرسنل بالاتر از آستانه

کل بجهای دزیمتری‌شده	شمار افراد بالاتر از آستانه	آستانه (mSv)	بیشینه دز (mSv)	دوره
۶۸۹۴	۵۱۲	۰.۰۵	۸۸.۸۴	۲۸
۶۹۹۷	۵۳۳	۰.۰۵	۳۵.۷۵	۲۹
...	...	۰.۰۵	...	...
۷۴۴۱	۵۷۶	۰.۰۷	۴۸.۹۶	۳۹

۳-۲- دز پوست در پزشکی هسته‌ای

از آنجا که کارکنان پزشکی هسته‌ای مستقیماً با رادیونوکلیدها (اغلب گسیل‌کننده‌های بتا) کار می‌کنند، توجه به دز پوست اهمیت فراوانی دارد. جدول ۳، میزان دز پوستی را در طول دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. گاهی پیک‌هایی مشاهده می‌شود (برای مثال ۱.۱۴ میلی‌سیورت)، اما مقادیر میانه معمولاً پایین‌اند. این امر نشان می‌دهد که در حالی که اکثر کارکنان از روش‌های مناسب استفاده می‌کنند، احتمالاً گروه کوچکی نیاز دارند تا پروتکل‌های جابه‌جایی منابع باز را بیشتر تقویت کنند.

جدول ۳: مقایسه شاخص‌های دز پوست در برخی دوره‌ها

بیشترین دز پوست (mSv)	میانگین دز پوست (mSv)	دوره
۳.۷۲	۰.۰۰۴	۲۸
۱۴.۱	۰.۰۰۴	۲۹
۴.۰۸	۰.۰۰۴	۳۴
...	...	...



۴- بحث و نتیجه گیری:

نسبت بالای کارکنانی که دُز کمتر از ۰۵۰۰ میلی‌سیورت دریافت کرده‌اند، نشانگر کارآمدی سیستم‌های حفاظت پرتویی در مراکز مختلف است. هم‌سو با گزارش‌های بین‌المللی [۹-۱۲]، استفاده از روپوش سربی، شیلدهای محافظ و کنترل‌های فنی (به‌ویژه در تجهیزات دیجیتال)، نقش مهمی در کاهش دُز ایفا می‌کند. در بخش‌هایی مانند آنژیوگرافی و پزشکی هسته‌ای که کاربر ارتباط نزدیک‌تری با منبع تابش دارد، خطر پرتوگیری بالاتر است؛ از این‌رو اتخاذ کنترل‌های ویژه ضروری به‌نظر می‌رسد.

با اینکه فیلم‌بج ارزان و متداول است، خطاهای ناشی از عوامل محیطی (رطوبت، حرارت) یا جابه‌جایی نامناسب می‌تواند بر صحت نتایج اثر بگذارد [۵،۶]. در این مطالعه، مواردی نظیر پارگی لفافه، برعکس قرار دادن فیلم در بج، و تابش عمدی یا سهوی به فیلم مشاهده شد. گرچه این موارد تنها بخش کوچکی از فیلم‌ها را شامل می‌شود، اما بر لزوم آموزش مداوم و بازبینی رویه‌ها برای پیشگیری از تکرار چنین خطاهایی تأکید می‌گردد.

با رعایت محدودیت‌های تعیین‌شده توسط ICRP و IAEA (از جمله حد ۲۰ میلی‌سیورت در سال برای دُز مؤثر شغلی)، وضعیت کشور ایران با استانداردهای جهانی هم‌گام است [۳،۱۳]. هرچند در برخی موارد، دُزهای بالا گزارش شده، اما روندی دائمی فراتر از حدود مجاز مشاهده نشده است. این یافته با الگوهای بین‌المللی همخوانی دارد و نشان می‌دهد توسعه تصویربرداری دیجیتال و ارتقای تدابیر حفاظتی توانسته دُز شغلی را در بسیاری از نقاط دنیا در سطحی پایین حفظ کند [۹،۱۴].

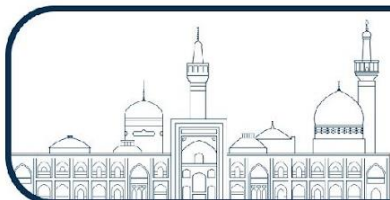
با این وجود، جامعه آماری این پژوهش اگرچه چندین هزار بج را در برمی‌گیرد، اما همچنان ممکن است همه گروه‌های کاری یا تمامی مراکز کوچک و کمتر شناخته‌شده را به‌طور کامل پوشش ندهد. به‌عنوان نمونه، برخی مراکز خصوصی یا بخش‌های صنعتی پراکنده ممکن است خارج از شبکه پایش اصلی قرار گرفته باشند. همچنین، از دیدگاه روش‌شناسی، لازم است در مطالعات آتی توزیع دُز براساس زیرگروه‌های دقیق‌تر (نظیر سال‌ها سابقه کار، نوع دستگاه، و شدت فعالیت) بررسی شود تا عوامل خطر احتمالی بهتر شناسایی گردند.

با توجه به محدودیت آشکارسازی در دزیمتر فیلم (۰۵۰۰ میلی‌سیورت)، امکان تمایز دُزهای بسیار پایین وجود ندارد. استفاده از دزیمترهای جدیدتر (مانند TLD، OSL یا دزیمتر دیجیتال) می‌تواند دقت اندازه‌گیری را افزایش دهد. همچنین، پایش طولانی‌مدت کارکنان، همراه با داده‌های دقیق‌تر (نظیر نوع فعالیت یا پروتکل‌های دستگاه)، می‌تواند در شناسایی عوامل خطر ساز و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش دُز سودمند باشد.

نتایج این مطالعه پنج‌ساله حاکی از آن است که بیشتر کارکنان پرتویی در ایران، دُزهایی به‌مراتب کمتر از حدود مجاز ملی و بین‌المللی دریافت می‌کنند و در مجموع، نظام‌های حفاظتی موجود کارآمدند. بیشترین دُزهای ثبت‌شده معمولاً در بخش‌های آنژیوگرافی و پزشکی هسته‌ای دیده می‌شود، اگرچه اغلب این موارد همچنان در محدوده مجاز قرار دارند. موارد نادر دُز بالا عمدتاً نتیجه خطاهای کاربری یا رویدادهای تک‌مرحله‌ای است و به روالی همیشگی بدل نشده‌اند.

برای ارتقای بیشتر سلامت شغلی و بهبود کیفیت داده‌ها، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

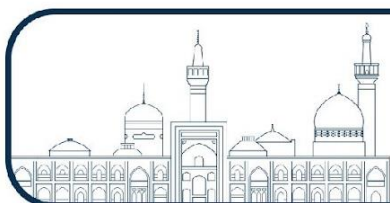
ارتقای آموزش‌ها: برگزاری مداوم دوره‌های آموزشی، تأکید بر استفاده صحیح از بج، پیشگیری از آلودگی و آگاهی مستمر از وضعیت حفاظتی.



تضمین کیفیت: انجام بازرسی‌های دوره‌ای از فرایند دزیمتری، اطمینان از کارایی تجهیزات و بررسی صحت وسایل محافظتی. گسترش روش‌های دزیمتری: استفاده از دزیمترهای مکمل (TLD، OSL یا دزیمتر دیجیتال) برای اندازه‌گیری دقیق‌تر و پایش آنی پرتوگیری. نظارت متمرکز بر گروه‌های پُرخطر: پایش ویژه بخش‌هایی که دُز بالاتر از میانگین گزارش می‌کنند و اصلاح رویه‌های حفاظتی در این گروه‌ها. با ادامه به‌روزرسانی تدابیر حفاظتی و روش‌های دزیمتری، چارچوب حفاظت پرتویی در ایران می‌تواند به شکلی مستمر اصل ALARA را محقق ساخته و سلامت پرسنل و کیفیت خدمات را حفظ کند.

۵- مراجع:

- [۱] Sadjadi A., et al., "Cancer occurrence in Iran in ۲۰۰۲, an international perspective." Asian Pacific Journal of Cancer Prevention ۶,۳ (۲۰۰۵): ۳۵۹.
- [۲] Habibi A. "Cancer in Iran. A survey of the most common cases." Journal of the National Cancer Institute ۳۴,۵ (۱۹۶۵): ۵۵۳-۵۶۹.
- [۳] Khorasani Z., Esmaeili DR., Introduction to Health Physics. Tehran; Sabz Asia (۱۹۹۸).
- [۴] IAEA, Safety Standards. Safety Series No ۱۱۵. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources. (۱۹۹۴).
- [۵] ICRP. ۱۹۹۰ "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection (ICRP)." ICRP Publication No. ۶۰ (Oxford and New York: Pergamon) (۱۹۹۱).
- [۶] Mason C., Mrabit K., "Radiation Protection: Implementation of the New International Basic Safety Standards." IAEA Regional Basic Professional Training Course on Radiation Protection. Bhabha Atomic Research Center, Mumbai (India), ۲۶-Dec.۱۸, (۱۹۹۸).
- [۷] Adams N., Heard M.J. and Holt P.D. "Film Dosimetry Practice with the AERE/PRS Film Holder" AERE-R-۴۶۶۹, (۱۹۶۵).
- [۸] Heard M.J. "Photographic Radiation Dosimetry and the Development of the AERE/RPS Film Dosimeter" J.Phot. Sci. ۱۳,۳۲, (۱۹۶۵).
- [۹] IAEA, Safety Standards. Safety Series No ۱۱۵. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources. (۱۹۹۴).
- [۱۰] UNSCEAR, "Occupational Radiation Exposures - Annex E." United Nation Scientific Committee on Applied Radiation, Vienna, (۲۰۰۰).
- [۱۱] Colgan P., Currivan L. and Fenton D., "An assessment of annual whole-body occupational radiation exposure in Ireland (۱۹۹۶-۲۰۰۵)". Radiat. Prot. Dosim. ۱۲۸, (۲۰۰۸): ۱۲-۲۰.
- [۱۲] Hasford F., Owusu-Banahene J. and et al., "Assessment of annual whole-body occupational radiation exposure in medical practice in Ghana (۲۰۰۰-۲۰۰۹)". Radiat Prot Dosim. doi:۱۰.۱۰۹۳/rpd/ncr۳۱۸ (۲۰۱۱).
- [۱۳] Rules of Working with Radiation in Diagnostic Radiology Centers. Atomic Energy Organization of Iran. (۲۰۰۵). [In Persian]
- [۱۴] Masood K., et al., "Assessment of Occupational Exposure Among Pakistani Medical Staff During ۲۰۰۷-۲۰۱۱." Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine ۳۵,۳ (۲۰۱۲):



طراحی بررسی میزان دز ناشی از چشمه گاما زای سزیم-۱۳۷ در فاصله های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰

سانتیمتری در هنگام وقوع سيل (کد مقاله : ۱۱۹۳)

بابامحمدی، شراره^۱ - اسماعیلی ترشابی، احمد^۱ - رضایی رایینی نژاد، محمدرضا^۱

۱. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،

کرمان، ایران

چکیده:

در هنگام وقوع بلایای طبیعی مانند سيل بروز حوادث هسته ای از قبیل خارج شدن چشمه ها از چاله سورس می تواند منجر به پیامد های جدی و غیر قابل جبران برای سلامت انسان و محیط زیست شود. در این تحقیق دز معادل از یک فانتوم بزرگسال *MIRD* در سه فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر با اکتیویته های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری در کد *MCNP* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که در اکتیویته ۱۰۰ میلی کوری و در فاصله ۱۰۰ سانتی متری از فانتوم دز معادل برابر با $0.0009/0 \pm \mu Sv/h$ و $0.012/0 \pm \mu Sv/h$ و $0.27/0.27 \pm \mu Sv/h$ شد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده شد که طبق گزارش $(2.28 \mu Sv/h)$ *ICRP* شخص در فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر در مجاور چشمه ۱۰۰ میلی کوری به ترتیب تقریباً به مدت حداکثر ۵ دقیقه، ۲ ثانیه، ۱ ساعت، ۵۳ دقیقه و ۲۴ ساعت مجاز است قرار گیرد.

کلمات کلیدی: Cs^{137} ، دز معادل، چشمه رادیواکتیو، *MIRD*، *MCNPX* فانتوم، حوادث طبیعی

Investigation of the Radiation Dose from the Cesium-¹³⁷ Gamma Source During Natural Disaster

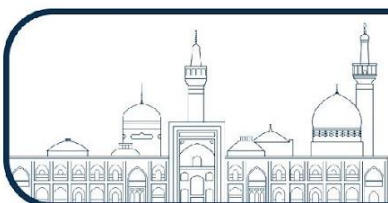
Babamohammadi, Sharareh^{۱*}, Esmaili Torshabi, ahmad^۱, Rezaei, Mohammad Reza^۱

۱. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

During natural disasters such as floods, nuclear incidents like the displacement of radioactive sources from their shielding can lead to serious and irreversible consequences for human health and the environment. In this study, the absorbed dose rate for an adult *MIRD* phantom was investigated using the *MCNP* code at three distances of ۱۰، ۵۰، and ۱۰۰ cm with activities of ۲۰، ۶۰، and ۱۰۰ mCi. The simulation results indicate that at an activity of ۱۰۰ mCi and a distance of ۱۰۰ cm from the phantom, the absorbed dose rate is $0.0009 \pm 0.0009 \mu Sv/h$. Furthermore, at the same activity, the absorbed dose rates at distances of ۱۰ cm and ۵۰ cm are $0.27/0.27 \pm \mu Sv/h$ and $0.012 \pm 0.012 \mu Sv/h$. According to the *ICRP* report *ICRP*($2.28 \mu Sv/h$), the person is allowed to be exposed to a ۱۰۰ mCi source for a maximum duration of approximately ۵ minute and ۲ seconds at a distance of ۱۰ cm, ۱ hour ۵۳ minutes ۲۸ seconds at a distance of ۵۰ cm, and ۲۴ hours at a distance of ۱۰۰ cm.

Key words: ^{137}Cs , Absorbed dose, Radioactive Source, *MCNPX*, *MIRD* Phantom, Environmental Hazards

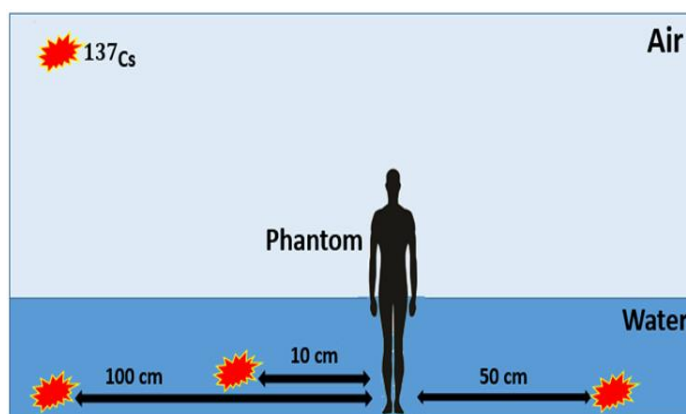


۱- مقدمه:

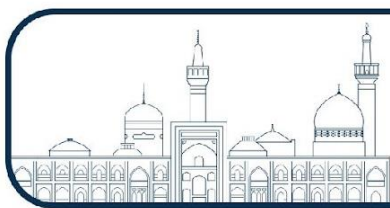
شناسایی برای انجام تحقیقات هسته‌ای و صنعتی و آزمایشگاهی از چشمه‌های رادیواکتیو با اکتیویته‌های مشخص و مناسب کار استفاده می‌شود [۱،۲]. محاسبه دز مؤثر ناشی از منابع رادیواکتیو در مراکز تحقیقاتی، صنعتی و همچنین آزمایشگاه‌های تولید چشمه‌های پرتوزا نقش مهمی در حفظ ایمنی و ارزیابی میزان پرتوگیری مجاز کارکنان و محققان دارد. این ارزیابی به‌ویژه برای اطمینان از ایمنی افراد شاغل در آزمایشگاه‌ها ضروری است [۳-۶]. عدم رعایت اصول ایمنی در برابر مواد رادیواکتیو می‌تواند پیامدهای جدی و جبران ناپذیری برای انسان و محیط زیست را به همراه داشته باشد [۷، ۸]. دز مؤثر سالانه برای پرتوکاران طبق گزارش کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتو این میزان دز کمتر از 20 mSv در سال و برای افراد غیر پرتوکار کمتر از 1 mSv در سال گزارش شده است [۹-۱۱]. مسئولیت تأمین منابع رادیواکتیو در ایران، با نظارت جامع دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی هسته‌ای، بر عهده‌ی سازمان انرژی اتمی ایران است که این امر بر اساس مقررات کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژی (ICRP) صورت می‌پذیرد [۱۲-۱۳]. کد MCNP که مخفف عبارت "Monte Carlo N-Particle" است، یک کد محاسباتی چندمنظوره و قدرتمند برای شبیه‌سازی ترابرد ذرات مختلف مانند نوترون‌ها، فوتون‌ها، الکترون‌ها و سایر ذرات بنیادی است. در این پژوهش از کد شبیه‌سازی MCNPX استفاده شده است [۱۳-۱۶]. در این تحقیق دز معادل از قرارگیری یک فانتوم بزرگسال MIRD در سه فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر در اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری در هنگام بروز حوادث طبیعی و خطای انسانی مورد بررسی قرار گرفت تا با رعایت اصول حفاظتی میزان مخاطرات تابشی برای پرسنل و کارکنان به حداقل برسد.

۲- روش کار:

در این تحقیق با هدف بررسی میزان دز معادل به ارگان‌های بدن در هنگام حوادث طبیعی مانند سیل ابتدا در کد شبیه‌سازی MCNPX یک فانتوم MIRD بزرگسال در فاصله‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر از ^{137}Cs با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری واقع شد. در این تحقیق سعی شد دز رسیده به کارکنان و پرسنل در فواصل مختلف محاسبه شود که در شکل ۱ شماتیک قرارگیری فانتوم و در ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر نسبت به منبع را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱: شماتیک نحوه قرارگیری چشمه ^{137}Cs در سه فاصله متفاوت از فانتوم (در هر یک از این فواصل سه اکتیویته ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری به طور مستقل مورد ارزیابی قرار گرفته است).



در این شبیه سازی، فانتوم در دو محیط آب و هوا قرار دارد در این دو محیط میزان دز رسیده به ارگان‌ها به طور هم زمان مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۱ دانسیته مواد شبیه سازی فانتوم را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱: چگالی مواد بیرونی استفاده شده در کد MCNPX

چگالی (g/cm ^۳)	ماده
۰.۰۱۲۹۳/۰	هوا
۱	آب

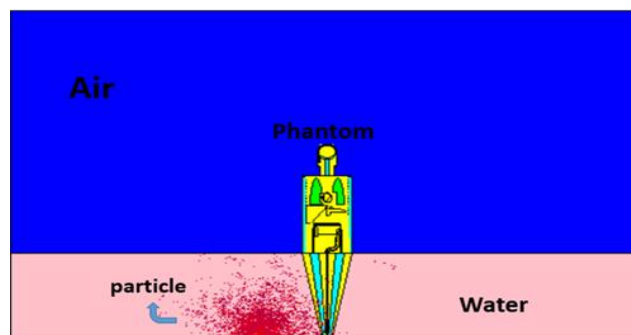
نتایج خروجی به دست آمده در کد شبیه سازی در تالی ۶f بر حسب MeV/g می‌باشد که با اعمال ضرایب به $\mu Sv/h$ تبدیل شده‌اند. در این تحقیق دز جذب شده پرسنل و کارکنان در هنگام وقوع سیل و خارج شدن Cs^{137} از چاله سورس بر حسب $\mu Sv/h$ محاسبه شده است تا میزان دز جذب شده در هنگام وقوع حوادث طبیعی مانند سیل مشخص شود. در کد شبیه سازی MCNPX چشمه Cs^{137} به صورت نقطه ای و ایزوتروپیک در نظر گرفته شد که در جدول ۲ اطلاعات حاصل از چشمه رادیواکتیو Cs^{137} در کارت داده در کد MCNPX را مشاهده می‌کنید.

جدول ۲: اطلاعات چشمه رادیواکتیو Cs^{137}

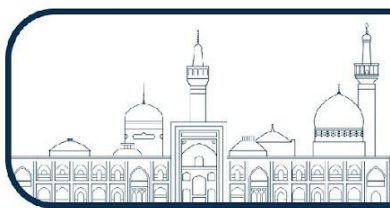
چشمه	انرژی (MeV)	واپاشی	نیمه عمر	اکتیویته
Cs^{137}	۶۶۲/۰	γ	۳۰/۱۷ سال	mCi ۱۰۰
				mCi ۶۰
				mCi ۲۰

۳- نتایج:

ابتدا یک فانتوم MIRD بزرگسال در فاصله‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر از Cs^{137} با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری واقع شد. که در شکل ۲ به عنوان نمونه تصویر قرارگیری فانتوم و منبع Cs^{137} در فاصله ۵۰ سانتی را در کد شبیه سازی MCNPX مشاهده می‌کنید.



شکل ۲: تصویر قرارگیری فانتوم و منبع Cs^{137} در فاصله ۵۰ سانتی متری در کد شبیه سازی MCNPX

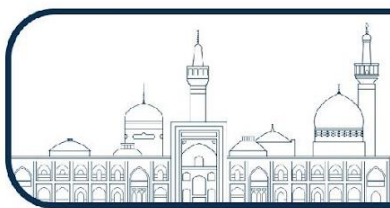


برای محاسبه میزان دز معادل ^{137}Cs ، در سه اکتیویته در فواصل مختلف مورد شبیه سازی قرار گرفت و سپس دز به ازای هر ذره منفرد در اندام‌های مختلف با استفاده از تالی f_1 محاسبه شد که نتایج در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: دز گاما به ازای هر ذره منفرد در اندام‌های مختلف در سه فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر برحسب (MeV/g)

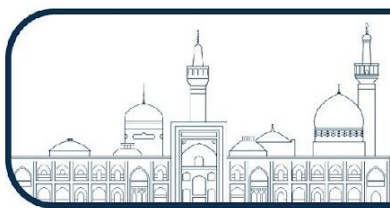
ارگان	ضریب وزنی	۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm
ریه	۰.۱۲	۴.۱۸E-۱۱	۱.۷۱E-۱۰	۱.۰۶E-۱۰
پوست	۰.۰۱	۳.۳۰E-۰۷	۸.۳۴E-۰۹	۱.۸۶E-۱۰
کبد	۰.۰۴	۲.۴۲E-۱۰	۳.۶۹E-۱۰	۲.۷۳E-۱۰
معهده	۰.۱۲	۷.۱۱E-۱۰	۳.۶۷E-۱۱	۰.۰۰E+۰۰
مثانه	۰.۰۴	۲.۵۰E-۰۹	۷.۳۷E-۱۰	۶.۷۸E-۱۱
مغز	۰.۰۱	۶.۵۱E-۰۹	۳.۶۱E-۰۹	۰.۰۰E+۰۰
مری	۰.۰۴	۱.۶۹E-۱۰	۶.۱۷E-۱۱	۷.۱۵E-۱۱
روده بزرگ	۰.۱۲	۳.۳۵E-۱۰	۰.۰۰E+۰۰	۰.۰۰E+۰۰
تیروئید	۰.۰۴	۲.۲۸E-۰۹	۵.۶۶E-۱۰	۱.۵۸E-۱۱
کلیه‌ها	۰.۰۱۵	۵.۹۹E-۰۷	۲.۱۳E-۰۸	۲.۵۵E-۱۰
پانکراس	۰.۰۱۵	۷.۴۶E-۱۰	۷.۷۲E-۱۰	۷.۸۸E-۱۱
طحال	۰.۰۱۵	۶.۰۹E-۱۰	۱.۳۱E-۱۰	۱.۵۲E-۱۰
تیموس	۰.۰۱۵	۱.۷۷E-۱۱	۷.۶۳E-۱۲	۱.۷۱E-۱۲
غدد فوق کلیوی	۰.۰۱۵	۲.۶۳E-۰۹	۶.۳۶E-۱۰	۱.۶۵E-۱۰
کیسه صفری	۰.۰۱۵	۶.۱۱E-۱۰	۳.۴۶E-۱۰	۵.۶۴E-۱۱
قلب	۰.۰۱۵	۱.۷۸E-۱۰	۱.۷۷E-۱۰	۳.۷۵E-۱۱
روده کوچک	۰.۰۱۵	۶.۳۸E-۱۱	۱.۳۵E-۱۰	۱.۰۲E-۱۰

نتایج جدول ۳ حاصل از کد شبیه‌سازی توسط تالی f_1 بر حسب MeV/g است که با ضریب $10^{-11} \times 1/6$ به گری تبدیل شد سپس برای محاسبه دز ناشی از فعالیت منبع با مقدار ۱۰۰ میلی کوری، ۶۰ میلی کوری و ۲۰ میلی کوری به ترتیب در 10^9 ، $10^9 \times 7/3 \times 2/22$ و $10^9 \times 7/4$ ضرب شد و برای ساعت در ۳۶۰۰ ضرب شد همچنین ضریب وزنی گاما برابر با یک می‌باشد [۱۷]. سپس نتایج جدول ۳ در ضریب وزنی هر اندام ضرب می‌شود که در نهایت از آنجا که ضریب وزنی پرتو گاما ۱ است، نتایج بر حسب گری (Gy) را می‌توان به طور مستقیم بر حسب سیورت (Sv) اعلام کرد و سپس نتایج بر حسب $\mu\text{Sv/h}$ محاسبه شد که دز معادل برای هر یک از ارگان‌ها در فاصله‌های مختلف با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری در جدول ۴ ارائه شده است.



جدول ۴: دز معادل برای هر یک از ارگان‌ها در فاصله‌های مختلف با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری

ارگان	$^{137}\text{Cs}, 20 \text{ mCi}$			$^{137}\text{Cs}, 60 \text{ mCi}$			$^{137}\text{Cs}, 100 \text{ mCi}$		
	cm ۱۰	۵۰ cm	۱۰۰ cm	cm ۱۰	۵۰ cm	۱۰۰ cm	cm ۱۰	۵۰ cm	۱۰۰ cm
ریه	۲.۱۴E-۰۹	۸.۷۶E-۰۹	۵.۴۴E-۰۹	۶.۴۱E-۰۹	۲.۶۳E-۰۸	۱.۶۳E-۰۸	۱.۰۷E-۰۸	۴.۳۸E-۰۸	۲.۷۲E-۰۸
پوست	۱.۴۱E-۰۶	۳.۵۵E-۰۸	۷.۹۳E-۱۰	۴.۲۲E-۰۶	۱.۰۷E-۰۷	۲.۳۸E-۰۹	۷.۰۴E-۰۶	۱.۷۸E-۰۷	۳.۹۶E-۰۹
کبد	۴.۱۲E-۰۹	۶.۲۹E-۰۹	۴.۶۶E-۰۹	۱.۲۴E-۰۸	۱.۸۹E-۰۸	۱.۴۰E-۰۸	۲.۰۶E-۰۸	۳.۱۴E-۰۸	۲.۳۳E-۰۸
معهده	۳.۶۳E-۰۸	۱.۸۸E-۰۹	۰.۰۰E+۰	۱.۰۹E-۰۷	۵.۶۴E-۰۹	۰.۰۰E+۰	۱.۸۲E-۰۷	۹.۴۰E-۰۹	۰.۰۰E+۰
مثانه	۴.۲۵E-۰۸	۱.۲۶E-۰۸	۱.۱۶E-۰۹	۱.۲۸E-۰۷	۳.۷۷E-۰۸	۳.۴۷E-۰۹	۲.۱۳E-۰۷	۶.۲۸E-۰۸	۵.۷۸E-۰۹
مغز	۲.۷۷E-۰۸	۱.۵۴E-۰۸	۰.۰۰E+۰	۸.۳۲E-۰۸	۴.۶۱E-۰۸	۰.۰۰E+۰	۱.۳۹E-۰۷	۷.۶۹E-۰۸	۰.۰۰E+۰
مری	۲.۸۹E-۰۹	۱.۰۵E-۰۹	۱.۲۲E-۰۹	۸.۶۶E-۰۹	۳.۱۶E-۰۹	۳.۶۶E-۰۹	۱.۴۴E-۰۸	۵.۲۶E-۰۹	۶.۱۰E-۰۹
روده بزرگ	۱.۷۱E-۰۸	۰.۰۰E+۰	۰.۰۰E+۰	۵.۱۴E-۰۸	۰.۰۰E+۰	۰.۰۰E+۰	۸.۵۷E-۰۸	۰.۰۰E+۰	۰.۰۰E+۰
تیروئید	۳.۸۸E-۰۸	۹.۶۶E-۰۹	۲.۷۰E-۱۰	۱.۱۶E-۰۷	۲.۹۰E-۰۸	۸.۱۰E-۱۰	۱.۹۴E-۰۷	۴.۸۳E-۰۸	۱.۳۵E-۰۹
کلیه‌ها	۳.۸۳E-۰۶	۱.۳۶E-۰۷	۱.۶۳E-۰۹	۱.۱۵E-۰۵	۴.۰۸E-۰۷	۴.۸۹E-۰۹	۱.۹۱E-۰۵	۶.۸۰E-۰۷	۸.۱۵E-۰۹
پانکراس	۴.۷۷E-۰۹	۴.۹۴E-۰۹	۵.۰۴E-۱۰	۱.۴۳E-۰۸	۱.۴۸E-۰۸	۱.۵۱E-۰۹	۲.۳۹E-۰۸	۲.۴۷E-۰۸	۲.۵۲E-۰۹
طحال	۳.۸۹E-۰۹	۸.۳۵E-۱۰	۹.۷۵E-۱۰	۱.۱۷E-۰۸	۲.۵۰E-۰۹	۲.۹۲E-۰۹	۱.۹۵E-۰۸	۴.۱۷E-۰۹	۴.۸۷E-۰۹
تیموس	۱.۱۳E-۱۰	۴.۸۸E-۱۱	۱.۰۹E-۱۱	۳.۴۰E-۱۰	۱.۴۶E-۱۰	۳.۲۷E-۱۱	۵.۶۶E-۱۰	۲.۴۴E-۱۰	۵.۴۵E-۱۱



عدد فوق کلیوی	$1.68E-08$	$4.06E-09$	$1.05E-09$	$5.05E-08$	$1.22E-08$	$3.16E-09$	$8.42E-08$	$2.03E-08$	$5.26E-09$
کیسه صفری	$3.90E-09$	$2.21E-09$	$3.61E-10$	$1.17E-08$	$6.64E-09$	$1.08E-09$	$1.95E-08$	$1.11E-08$	$1.80E-09$
قلب	$1.14E-09$	$1.13E-09$	$2.40E-10$	$3.41E-09$	$3.39E-09$	$7.19E-10$	$5.68E-09$	$5.65E-09$	$1.20E-09$
روده کوچک	$4.08E-10$	$8.62E-10$	$6.54E-10$	$1.22E-09$	$2.58E-09$	$1.96E-09$	$2.04E-09$	$4.31E-09$	$3.27E-09$

دز معادل، منبع رادیواکتیو ^{137}Cs با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری برای پرتوکاران و افرادی در در فواصل ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ از منبع قرار دارند در جدول ۵ مشخص شده است.

جدول ۵: دز معادل بر حسب $\mu\text{Sv/h}$ ، منبع رادیواکتیو ^{137}Cs

^{137}Cs , ۲۰ mCi			^{137}Cs , ۶۰ mCi			^{137}Cs , ۱۰۰ mCi		
۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm	۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm	۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm
$43/5 \pm 0.5/0$	$24/0 \pm 0.2/0$	$0.18/0 \pm 0.000$	$30/16 \pm 0.1$	$72/0 \pm 0.0$	$0.5/0 \pm 0.000$	$18/27 \pm 2$	$20/1 \pm 0.12$	$0.9/0 \pm 0.0009/0$
	.	۱/۰	۶	۷/۰	۵/۰	۷/۰	/۰	.

جدول ۶: حداکثر زمان تقریبی مجاز برای حضور شخص در کنار منبع رادیواکتیو ^{137}Cs

^{137}Cs , ۲۰ mCi			^{137}Cs , ۶۰ mCi			^{137}Cs , ۱۰۰ mCi		
۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm	۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm	۱۰ cm	۵۰ cm	۱۰۰ cm
۲۵ دقیقه و ۹ ثانیه	۹ ساعت و ۲۷ دقیقه و ۲۰ ثانیه	۱۲۰ ساعت و ۱۱ دقیقه و ۳۲ ثانیه	۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه	۳ ساعت و ۹ دقیقه و ۶ ثانیه	۴۰ ساعت و ۳ دقیقه	۵ دقیقه و ۱ ثانیه	۱ ساعت و ۵۳ دقیقه و ۲۸ ثانیه	۲۴ ساعت و ۲ دقیقه و ۱۸ ثانیه

۴- بحث و نتیجه گیری:

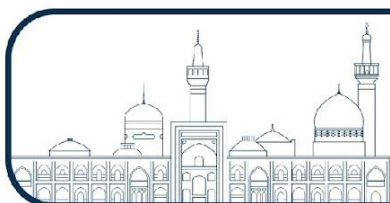
این تحقیق به منظور بررسی دز معادل رسیده به کارکنان، پرسنل که با منابع رادیواکتیو ^{137}Cs با اکتیویته‌های مختلف سر و کار دارند در اثر خروج چشمه از چاله سورس در هنگام وقوع سیل انجام شد. به همین منظور با استفاده از کد شبیه MCNPX



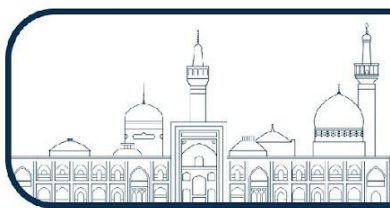
فانتوم بزرگسال در دو محیط هوا و آب مورد شبیه سازی قرار گرفت که با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شد که دز معادل رسیده به کل ارگان‌های بدن در اکتیویته ۱۰۰ میلی کوری و در فاصله‌های ۱۰۰ سانتی‌متری 0.0009 ± 0.009 ، همچنین در فاصله ۵۰ سانتی متری 0.012 ± 0.020 و همچنین در فاصله ۱۰ سانتی‌متری برابر با $0.27/18 \pm 0.27$ ، دز معادل بر حسب $\mu Sv/h$ می‌باشد. همچنین دز رسیده به کل ارگان‌های بدن در اکتیویته ۶۰ میلی کوری و در فاصله‌های ۱۰۰ سانتی‌متری 0.005 ± 0.005 ، در فاصله ۵۰ سانتی متری 0.007 ± 0.072 و همچنین در فاصله ۱۰ سانتی‌متری $0.16/30 \pm 0.16$ ، دز معادل بر حسب $\mu Sv/h$ می‌باشد. و همچنین دز رسیده به کل ارگان‌های بدن در اکتیویته ۲۰ میلی کوری و در فاصله‌های ۱۰۰ سانتی‌متری 0.001 ± 0.018 ، در فاصله ۵۰ سانتی متری 0.002 ± 0.24 و همچنین در فاصله ۱۰ سانتی‌متری 0.005 ± 0.005 ، دز معادل بر حسب $\mu Sv/h$ می‌باشد. نتایج حاصل تحقیق در جدول ۵ نشان می‌دهد که هنگام بروز حوادث طبیعی مانند سیل در فواصل ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری، دز معادل طبق گزارش کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها ($\mu Sv/h$) (ICRP) ۲/۲۸ کمتر از حد مجاز می‌باشد [۱۸]. همچنین نتایج حاصل از تحقیق در فاصله ۱۰ سانتی متری با اکتیویته‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی کوری، بیشتر از حد مجاز می‌باشد که نشان می‌دهد حضور کارکنال و پرسنل در هنگام وقوع سیل در این فواصل با رعایت اصول حفاظتی در برابر اشعه صورت گیرد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۶ اگر شخصی در فاصله ۱۰ سانتی متری از منبع ^{137}Cs با اکتیویته ۱۰۰ میلی کوری بایستد فرد می‌تواند حداکثر حدود ۵ دقیقه و ۱ ثانیه یا به عبارتی حداکثر ۳۰۱ ثانیه در کنار چشمه ^{137}Cs بدون رعایت اصول حفاظتی مجاز است قرار گیرد. در صورت حضور شخص بیشتر از زمان گزارش شده طبق گزارش کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها (ICRP)، بیشتر از حد مجاز می‌باشد لذا لازم است با رعایت اصول حفاظتی در برابر اشعه از تجهیزات مناسب استفاده شود.

۵-مراجع:

- [۱] Ridikas D. IAEA activities in support of nuclear physics research and applications. In: Journal of Physics: Conference Series ۲۰۲۰ Dec ۱ (Vol. ۱۶۴۳, No. ۱, p. ۰۱۲۲۰۶). IOP Publishing.
- [۲] Donohue DL. Strengthening IAEA safeguards through environmental sampling and analysis. Journal of Alloys and Compounds. ۱۹۹۸ Jun ۱۲; ۲۷۱: ۱۱-۸.
- [۳] Kudryashev VA, Kim DS. Determination of the total effective dose of external and internal exposure by different ionizing radiation sources. Radiation Protection Dosimetry. ۲۰۱۹ Dec ۳۱; ۱۸۷(۱): ۱۲۹-۳۷.
- [۴] Fisher DR, Fahey FH. Appropriate use of effective dose in radiation protection and risk assessment. Health physics. ۲۰۱۷ Aug ۱; ۱۱۲(۲): ۱۰۲-۹.
- [۵] Mohammadi SB, Heydarizade Y, Rezaie MR. Measurement of the radiation hazards and distribution of natural radioactive elements in the Graduate University of Advanced Technology. Journal of Instrumentation. ۲۰۲۳ May ۱۱; ۱۸(۰۵): T۰۵۰۰۲.
- [۶] Evaluation of high-energy brachytherapy source electronic disequilibrium and dose from emitted electrons.



- [۷] Krstic D, Nikezic D. External doses to humans from ^{137}Cs in soil. Health physics. ۲۰۰۶ Sep ۱;۹۱(۳):۲۴۹-۵۷.
- [۸] Skuterud L, Thørring H. Fallout ^{137}Cs in reindeer herders in Arctic Norway. Environmental Science & Technology. ۲۰۱۵ Mar ۳;۴۹(۵):۳۱۴۵-۹.
- [۹] Abel J. Radiation safety: New international standardis.
- [۱۰] Makhijani A. The use of reference man in radiation protection standards and guidance with recommendations for change. Takoma Park, MD: Institute for Energy and Environmental Research; ۲۰۰۸ Dec.
- [۱۱] Linton OW, Mettler Jr FA. National council on radiation protection and measurements. In National conference on dose reduction in CT, with an emphasis on pediatric patients. AJR Am J Roentgenol ۲۰۰۳ Aug (Vol. ۱۸۱, No. ۲, pp. ۳۲۱-۳۲۹).
- [۱۲] Vañó E, Miller DL, Martin CJ, Rehani MM, Kang K, Rosenstein M, Ortiz-López P, Mattsson S, Padovani R, Rogers A. ICRP publication ۱۳۵: diagnostic reference levels in medical imaging. Annals of the ICRP. ۲۰۱۷ Oct;۴۶(۱):۱-۴۴.
- [۱۳] Charles MW. ICRP Publication ۱۰۳: Recommendations of the ICRP.
- [۱۴] Kahn H, Mann I. Monte Carlo.
- [۱۵] Waters LS, McKinney GW, Durkee JW, Fensin ML, Hendricks JS, James MR, Johns RC, Pelowitz DB. The MCNPX Monte Carlo radiation transport code. In AIP conference Proceedings ۲۰۰۷ Mar ۱۹ (Vol. ۸۹۶, No. ۱, pp. ۸۱-۹۰). American Institute of Physics.
- [۱۶] Mohammadi SB, Rezaie MR, Zareie N. Formulation of Aflatoxins B₁ & B₂ reduction in corn by low level gamma irradiation. Toxicon. ۲۰۲۲ Oct ۳۰;۲۱۸:۸۳-۷.
- [۱۷] Pelowitz DB, Durkee JW, Elson JS, Fensin ML, Hendricks JS, James MR, Johns RC, McKinney GW, Mashnik SG, Verbeke JM, Waters LS. MCNPX ۲.۷.۰ Extensions. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-۱۱-۰۲۲۹۵. ۲۰۱۱ Mar ۱۰;۴.
- [۱۸] Protection R. ICRP publication ۱۰۳. Ann ICRP. ۲۰۰۷;۳۷(۲,۴):۲.



بررسی تجربی ترانزیستورهای BJT و خازن های الکترولیتی و پلی استر به عنوان دزیمتر با

استفاده از پرتوهای الکترون (کد مقاله : ۱۲۰۹)

شیرمردی، سید پژمان^۱ - مسیبی، آرمین^{۱*} - بهرامی، فرامرز^۲ - رضایی مرساق، منصور^۲ - معصومه، سلیمانی نیا^۱ - محمد، اسدی^۳

^۱ - گروه پژوهشی پرتوفاوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران.

^۲ - دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

^۳ - پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران.

چکیده:

در این پژوهش رفتار ترانزیستورهای BJT و خازن های الکترولیتی و پلی استر که در پرتوهای الکترون 10 MeV خروجی از دستگاه شتابدهنده رودوترون TT^{200} مرکز پرتوآیند ایران مرکزی (یزد)، بررسی شده است. ۳ نوع ترانزیستور سیلیکونی PNP با شماره های $2N^{3904}$ ، A^{733} ، BC^{327-40} و نوع خازن الکترولیتی $470, 47 \mu F$ ، 1000 و نوع خازن پلی استر PM^{105} (یک نانوفاراد)، K^{102} (یک میکرو فاراد). ضریب تقویت جریان یعنی hfe که همان کمیت β ترانزیستورها و ظرفیت خازن های الکترولیتی و پلی استر قبل و بعد از پرتودهی در 10 دز 10 ، 100 ، 300 ، 450 ، 900 ، 1800 ، 3600 ، 7200 ، 14400 کیلوگری اندازه گیری شده اند و نمودارهای تغییرات ظرفیت خازن ها و بهره جریان یا همان β ترانزیستور بر اساس تغییرات شدت دز پرتودهی ترسیم شده است. کلمات کلیدی: ترانزیستور، خازن، شار الکترون و پرتودهی.

Experimental investigation of BJT transistors and electrolytic and polyester capacitors as dosimeters using electron beams

Shirmardi, Seyed Pezhman¹, Mosayebi, Armin^{1*}, Bahrami, Faramarz², Rezaei mersagh, Mansour², Soleimaninia, Masoume¹, Asadi, Mohammad³

¹-Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

²-Islamic Azad University, Tehran, IRAN.

³- Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

Abstract:

In this research, the behavior of BJT transistors and electrolytic and polyester capacitors in 10 MeV electron beams output from the TT^{200} Rhodotron accelerator of the Central Iran Photo process Center (Yazd) has been investigated. 3 types of PNP silicon transistors with numbers $2N^{3904}$ ، A^{733} ، BC^{327-40} and 3 types of electrolytic capacitors $470, 47 \mu F$ ، 1000 and 2 types of polyester capacitors PM^{105} (one nano-farad)، K^{102} (one microfarad). The current amplification factor (hfe), which is the same quantity as the β of transistors and the capacitance of electrolytic and polyester capacitors, have been measured before and after irradiation at 10 doses, and the graphs of changes in the capacitance of capacitors and the



current gain or β of the transistor have been drawn based on changes in the radiation dose intensity.

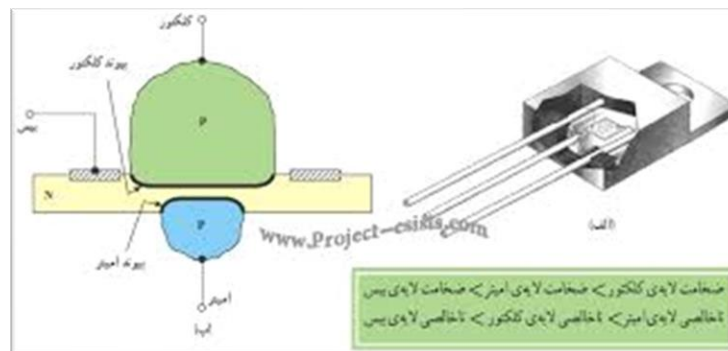
Key words: Transistor, Capacitor, Electron Flux and Irradiation.

۱- مقدمه:

ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ در آزمایشگاه‌های بل هنگام تحقیق برای تقویت‌کننده‌های بهتر و یافتن جایگزینی بهتر برای رله‌های مکانیکی اختراع شد. رله‌های خلا، صوت و موسیقی را در نیمه اول قرن بیستم تقویت کرده بودند اما توان زیادی مصرف می‌کردند و سریعاً می‌سوختند. شبکه‌های تلفن نیز به صدها هزار رله مکانیکی برای اتصال مدارات به همدیگر نیاز داشتند تا شبکه بتواند سر پا بایستد و چون این رله‌های مکانیکی بودند لازم بود برای عملکرد مطلوب همیشه تمیز باشند. در نتیجه نگهداری و سرویس آن‌ها مشکل و پرهزینه بود [۱-۲].

ترانزیستور را معمولاً به عنوان یکی از قطعات الکترونیک می‌شناسند. ترانزیستور یکی از ادوات حالت جامد است که از عناصری به نام نیمه‌هادی مانند سیلیکون و ژرمانیوم ساخته می‌شود [3].

عمل جادویی که ترانزیستور می‌تواند انجام دهد این است که می‌تواند مقدار هادی بودن خود را تغییر دهد. هنگامی که لازم است یک هادی باشد می‌تواند هدایت خوبی داشته باشد و هنگامی که لازم است تا به عنوان عایق عمل کند جریان بسیار کمی را از خود عبور می‌دهد که می‌توان آن را ناچیز شمرد [4-10].



شکل (۱) ساختار ترانزیستور.

گرایش مستقیم پیوند بیس-امیتر باعث می‌شود تا یک جریان نفوذی الکترون‌ها را از ناحیه امیتر به بیس کشانده و متقابلاً حفره‌ها را از بیس به امیتر جذب نماید. معمولاً نسبت ناخالصی امیتر بسیار بیشتر از بیس در نظر گرفته می‌شود تا نسبت جریان الکترون به حفره بیشتر باشد. الکترون‌هایی که از پیوند عبور کرده و وارد بیس می‌شوند در بیس به عنوان ناقل اقلیت محسوب می‌شوند که غلظت آن‌ها در مرز امیتر بیشتر و در مرز کلکتور کمتر خواهد بود. در مرز امیتر این غلظت با رابطه صفحه بعد برابر خواهد شد:

$$n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T} \quad (1)$$

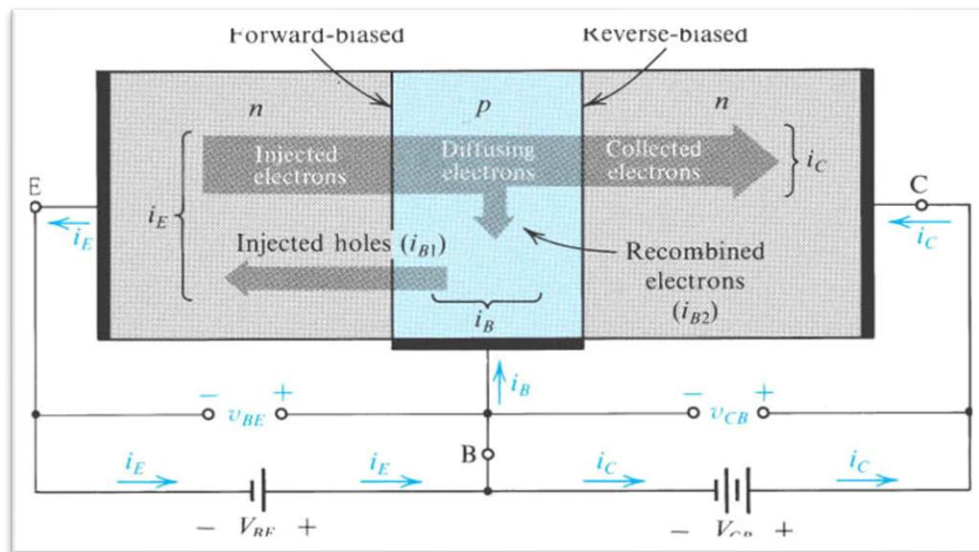
تجمع الکترون‌ها در بیس باعث به وجود آمدن یک جریان نفوذی به سمت کلکتور می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:



$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$= A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W} \right) \quad (2)$$

البته تعدادی از الکترون‌ها در بیس با حفره‌ها ترکیب می‌شوند که باعث می‌شود تاجریانی که به کلکتور می‌رسد کمتر از جریانی باشد که از امیتر می‌آید.



شکل (۲) عبور جریان از ترانزیستور.

به علت اینکه ولتاژ کلکتور مثبت است الکترون‌هایی که به مرز بیس و کلکتور می‌رسند توسط این ولتاژ جذب شده و از ناحیه تخلیه کلکتور-بیس عبور کرده و به ناحیه کلکتور می‌رسند.

این جریان تقریباً برابر با جریان به وجود آمده در ناحیه بیس خواهد بود:

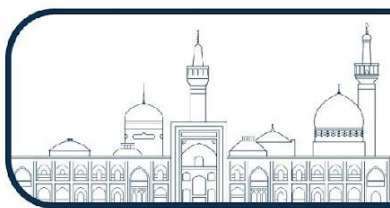
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (3)$$

دقت شود که مقدار جریان i_C مستقل از ولتاژ کلکتور-بیس است. فقط باید ولتاژ کلکتور مثبت باشد تا پیوند کلکتور-بیس در گرایش معکوس قرار گیرد.

جریان بیس دارای دو مؤلفه است: یکی حفره‌هایی که از بیس وارد امیتر می‌شوند و دیگری جریانی که باید از بیرون تأمین شود تا جبران حفره‌هایی که با الکترون‌های جمع شده در بیس ترکیب می‌شوند را بنماید.

از مقایسه جریان بیس با جریان کلکتور به یک رابطه مهم در ترانزیستور می‌رسیم:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} \quad (4)$$



مقدار ضریب β برای یک ترانزیستور به خصوص ثابت بوده و در حد ۵۰ تا ۲۰۰ می‌باشد. این ضریب را بهره جریان امیتر مشترک می‌نامند.

از آنجائیکه جریانی که وارد ترانزیستور می‌شود با جریانی که از آن خارج می‌شود برابر است داریم:

$$i_E = i_C + i_B \quad (5)$$

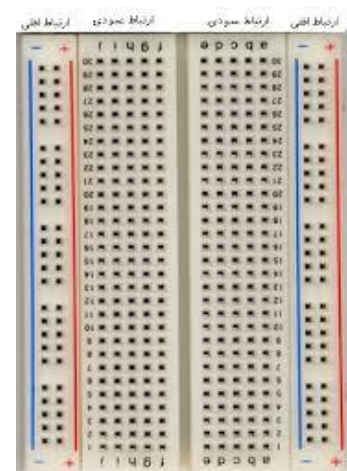
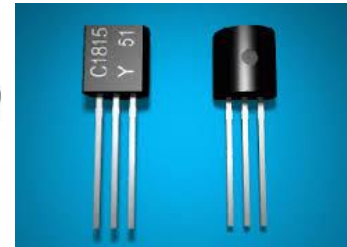
و لذا:

$$i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C \quad (6)$$

۲- روش کار:

۱-۲- وسایل موردنیاز انجام آزمایش

۱۰ سری از ۳ مدل ترانزیستورهای نوع PNP - A733, 2N3906, BC327-40 و ۱۰ سری از ۵ مدل خازن‌های الکتrolیتی: $47\mu F, 1000\mu F, 470\mu F$ / پلی‌استر: 2A102K, PM105j فراهم گردید. سپس یک بردبورد جهت بستن مدار و ۳ دستگاه مولتی متر دیجیتال DT9205A جهت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان مدار و بهره جریان ترانزیستور و دو دستگاه منبع ولتاژ متغیر ۰ تا ۱۰ ولت و یک دستگاه منبع ولتاژ متغیر دوکاناله مدل (Double DC Power Mastech HY3005-2) جهت انجام آزمایش‌ها فراهم گردید.



شکل (۳) نمای وسایل موردنیاز آزمایش.



۲-۲- مراحل انجام آزمایش

مرحله اول) دسته‌بندی ترانزیستورها و خازن‌ها به ده قسمت و قرار دادن روی ده قطعه یونولیت 30×30 برای انجام پرتودهی (در هر دسته یک مدل از تمامی ترانزیستور و خازن‌ها وجود دارد).



شکل (۴) دسته‌بندی ترانزیستورها و خازن‌ها جهت پرتودهی.

مرحله دوم) ابتدا تشخیص نوع پایه‌های ترانزیستور (بیس، کلکتور و امیتر) با مطالعه دیتاشیت‌های آن‌ها انجام شد و در مرحله بعد اندازه‌گیری بهره جریان (h_{fe}) ترانزیستورها توسط مولتی متر قبل از پرتودهی و ثبت آن برای مقایسه با مقدار بهره جریان بعد از اینکه ترانزیستورها تحت پرتودهی الکترون 10 MeV قرار گرفتند، انجام گردید.

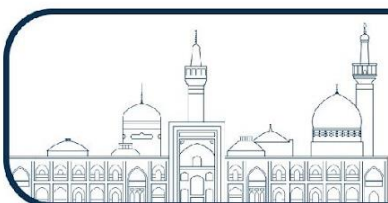
مرحله سوم) اندازه‌گیری ظرفیت خازن‌های پلی‌استر و الکترولیتی توسط مولتی متر و ثبت آن قبل از پرتودهی و مقایسه با مقدار ظرفیت خازن‌ها بعد از اینکه در معرض پرتودهی الکترون 10 MeV قرار گرفتند.

مرحله چهارم) در این مرحله پرتودهی صورت گرفت. برای انجام پرتودهی ابتدا باید دز پرتودهی دستگاه را روی مقدار موردنظر را تنظیم کرد و برای انجام این کار یک قطعه وریستور برای پرتودهی روی تسمه‌نقاله به درون ساختمان پرتودهی فرستاده و بعد از پرتودهی پارامتر آن توسط کالری متر اندازه گرفته و مقدار دز پرتودهی را استخراج که این فرآیند تقریباً ۱۵ دقیقه زمان می‌برد.

مرحله پنجم) مرحله پایانی اندازه‌گیری بهره جریان ترانزیستور و ظرفیت خازن‌های موردنظر توسط مولتی متر سپس اندازه‌گیری مشخصه ولتاژ-جریان ترانزیستور با قرار دادن در مدار صورت گرفت.



شکل (۵) تجهیزات اندازه‌گیری.

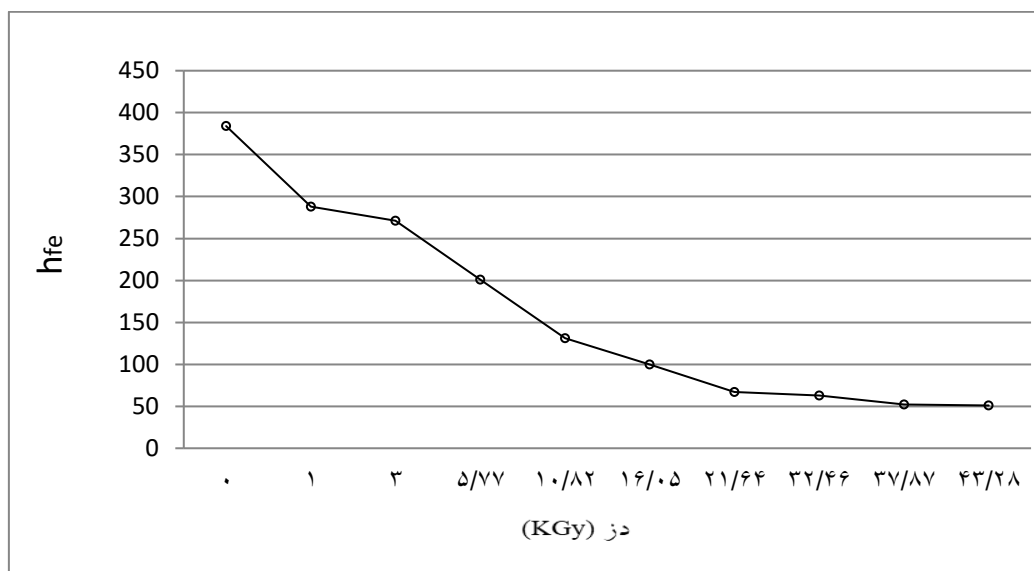


۱-۳- ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی PNP

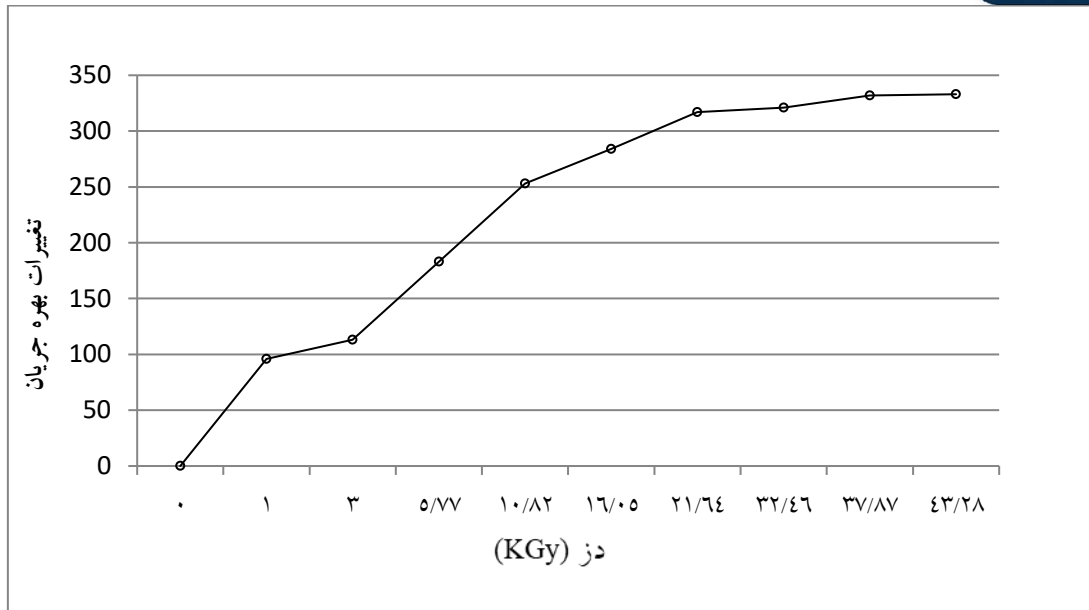
در جدول شماره ۱ مقدار دز پرتو دهی برای اولین نوع از ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی PNP نشان داده شده است. در شکل شماره ۶ و ۷ مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور A_{733} تحت پرتو دهی الکترون 10 MeV در مقدار دزهای ذکر شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور A_{733} تحت پرتو دهی الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتو دهی.

ردیف	دوز تابشی (KGy)	بهره جریان (h_{fe})	تغییرات بهره جریان (Δh_{fe}) $\beta \Delta$
۱	۰	۳۸۴	۰
۲	۱	۲۸۸	۹۶
۳	۳	۲۷۱	۱۱۳
۴	۵/۷۷	۲۰۱	۱۸۳
۵	۱۰/۸۲	۱۳۱	۲۵۳
۶	۱۶/۰۵	۱۰۰	۲۸۴
۷	۲۱/۶۴	۶۷	۳۱۷
۸	۳۲/۴۶	۶۳	۳۲۱
۹	۳۷/۸۷	۵۲	۳۳۲
۱۰	۴۳/۲۸	۵۱	۳۳۳



شکل (۶) بهره جریان ترانزیستور A_{733} تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتو دهی.



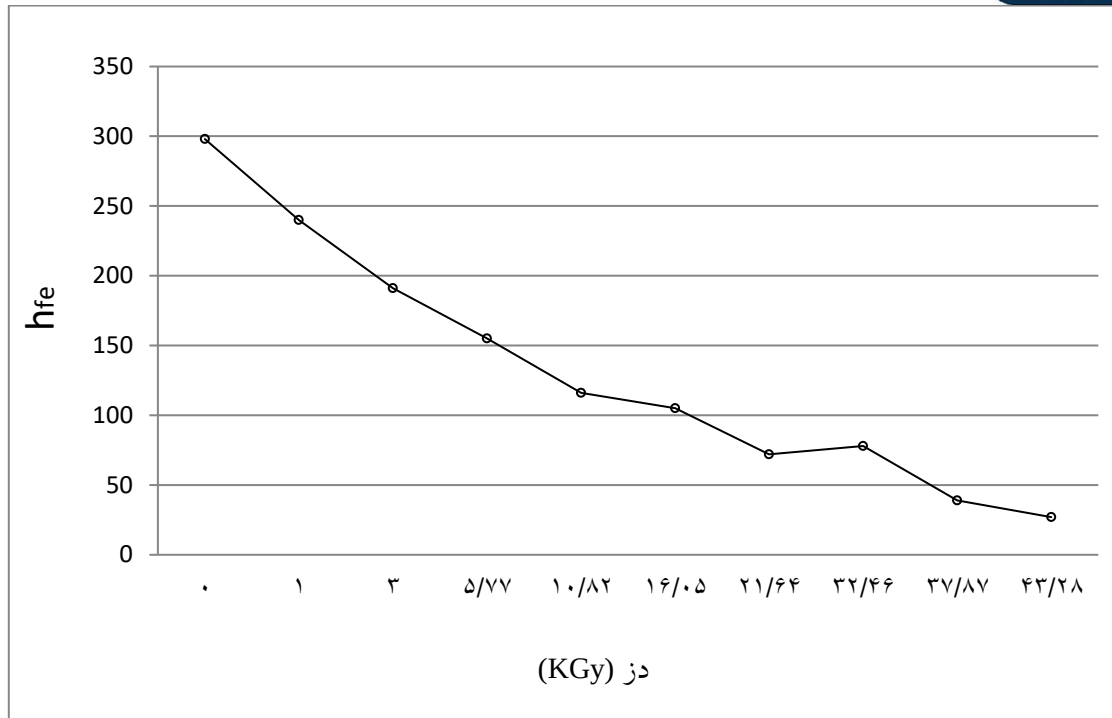
شکل (۷) تغییرات بهره جریان ترانزیستور A733 تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش مقدار دز پرتودهی، تغییرات بهره جریان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و طبق نمودار مشخص شده است که تقریباً در دز ۲۱ کیلوگری به نقطه اشباع رسیده است.

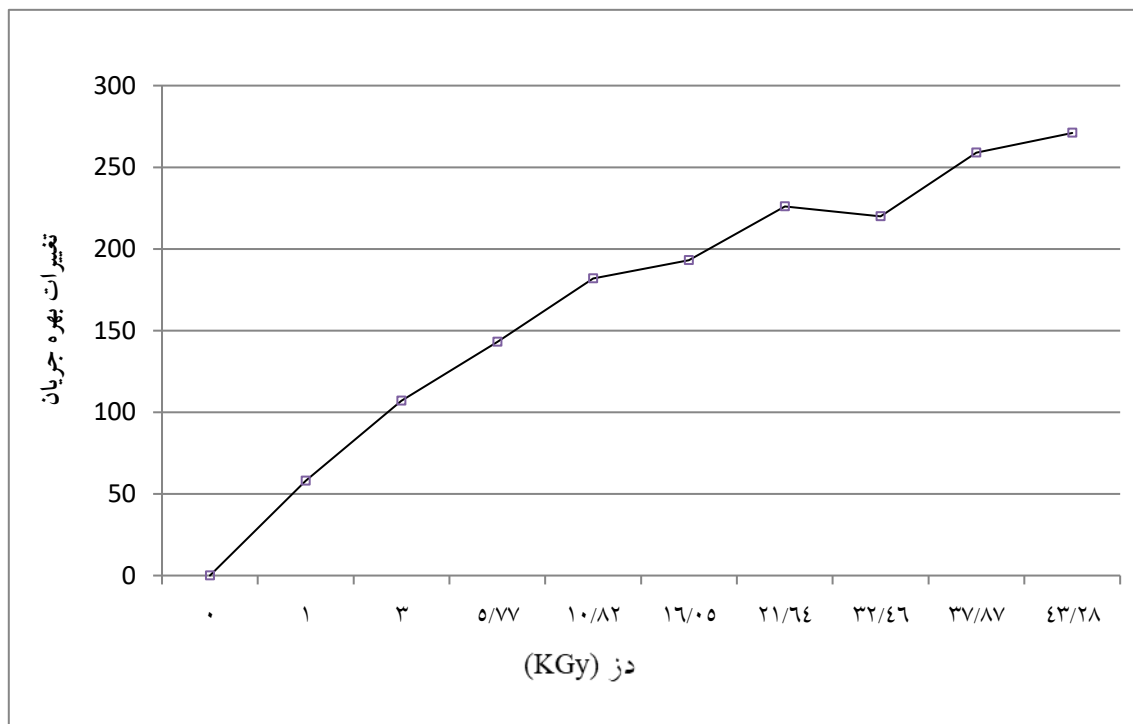
جدول ۲: مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور BC^{۳۲۷-۴۰} تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز

پرتودهی.

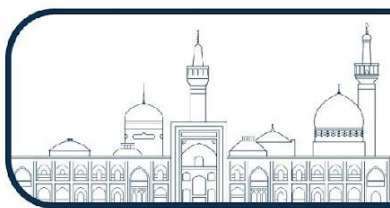
تغییرات بهره جریان (Δh_{fe}) $\beta \Delta$	بهره جریان (h_{fe})	دوز تابشی (KGy)	ردیف
۰	۲۹۸	۰	۱
۵۸	۲۴۰	۱	۲
۱۰۷	۱۹۱	۳	۳
۱۴۳	۱۵۵	۴/۹۶	۴
۱۸۲	۱۱۶	۱۱/۱۵	۵
۱۹۳	۱۰۵	۱۶/۱۱	۶
۲۲۶	۷۲	۲۲/۳	۷
۲۲۰	۷۸	۳۳/۴۵	۸
۲۵۹	۳۹	۳۸/۴۱	۹
۲۷۱	۲۷	۴۴/۶۰	۱۰



شکل (۸) بهره جریان ترانزیستور BC327-40 تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.



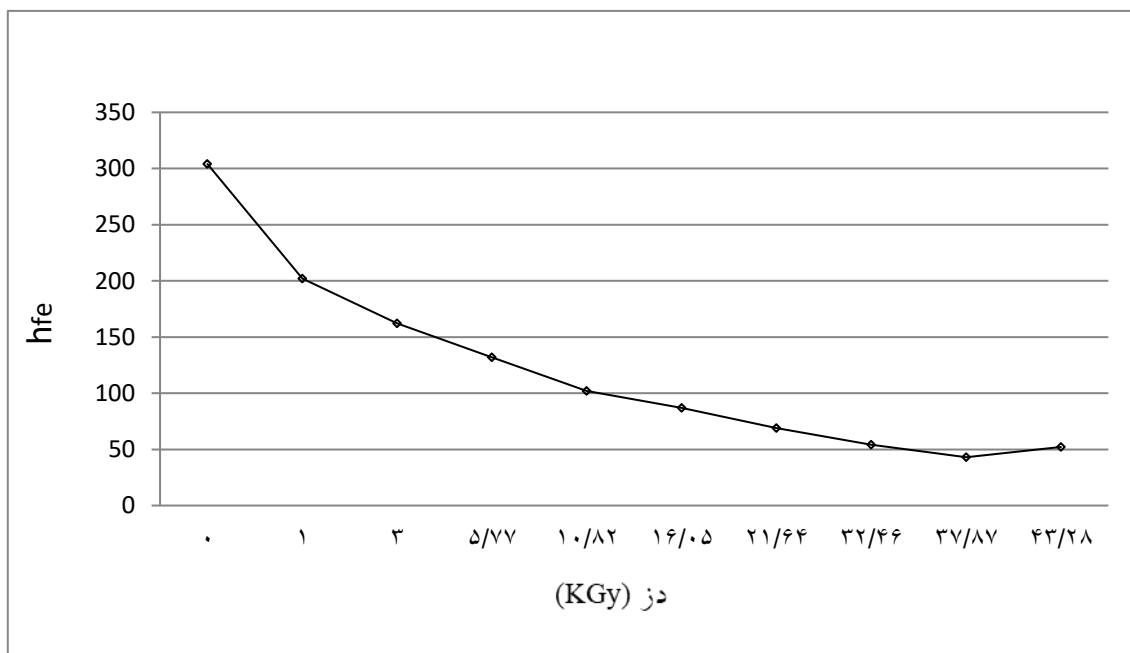
شکل (۹) تغییرات بهره جریان ترانزیستور BC327-40 تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.



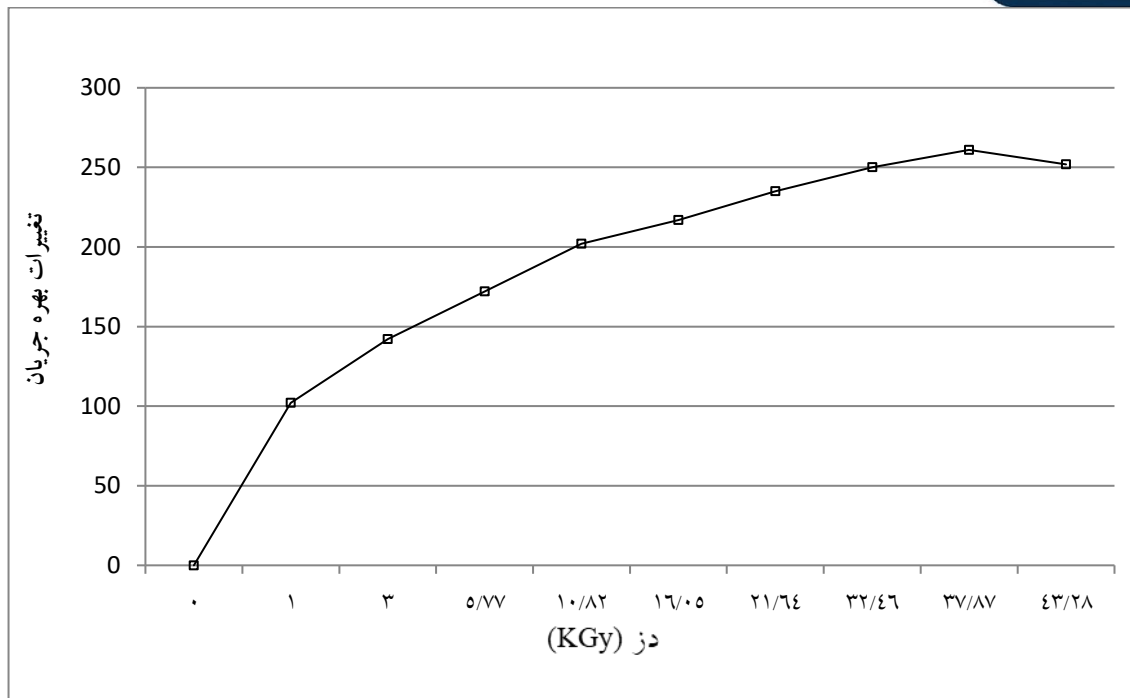
همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش مقدار دز پرتودهی، تغییرات بهره جریان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و طبق نمودار ها هنوز به نقطه اشباع نرسیده است.

جدول ۳: جدول (۵-۲) مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور ${}^{239}\text{Pu}$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

تغییرات بهره جریان (Δh_{fe}) $\beta\Delta$	بهره جریان (h_{fe})	دوز تابشی (KGY)	ردیف
۰	۳۰۴	۰	۱
۱۰۲	۲۰۲	۱	۲
۱۴۲	۱۶۲	۳	۳
۱۷۲	۱۳۲	۵/۷۷	۴
۲۰۲	۱۰۲	۱۰/۸۲	۵
۲۱۷	۸۷	۱۶/۰۵	۶
۲۳۵	۶۹	۲۱/۶۴	۷
۲۵۰	۵۴	۳۲/۴۶	۸
۲۶۱	۴۳	۳۷/۸۷	۹
۲۵۲	۵۲	۴۳/۲۸	۱۰



شکل (۱۰) بهره جریان ترانزیستور ${}^{239}\text{Pu}$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.



شکل (۱۱) تغییرات بهره جریان ترانزیستور ۲N۳۹۰۶ تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش مقدار دز پرتودهی، تغییرات بهره جریان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و طبق نمودار مشخص شده است که تقریباً در دز ۳۷ کیلوگری به نقطه اشباع رسیده است.

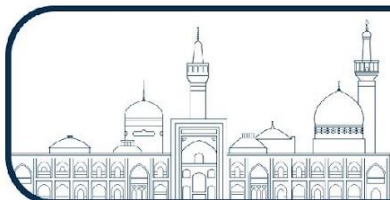
a. تغییرات ظرفیت خازن

در این مرحله تغییرات ظرفیت خازنهای الکترولیتی: $1000 \mu F$, $470 \mu F$, $47 \mu F$ و خازن پلی‌استر: PM105j (1nF), 2A102K (1μF) مورد آزمایش قرار گرفت.

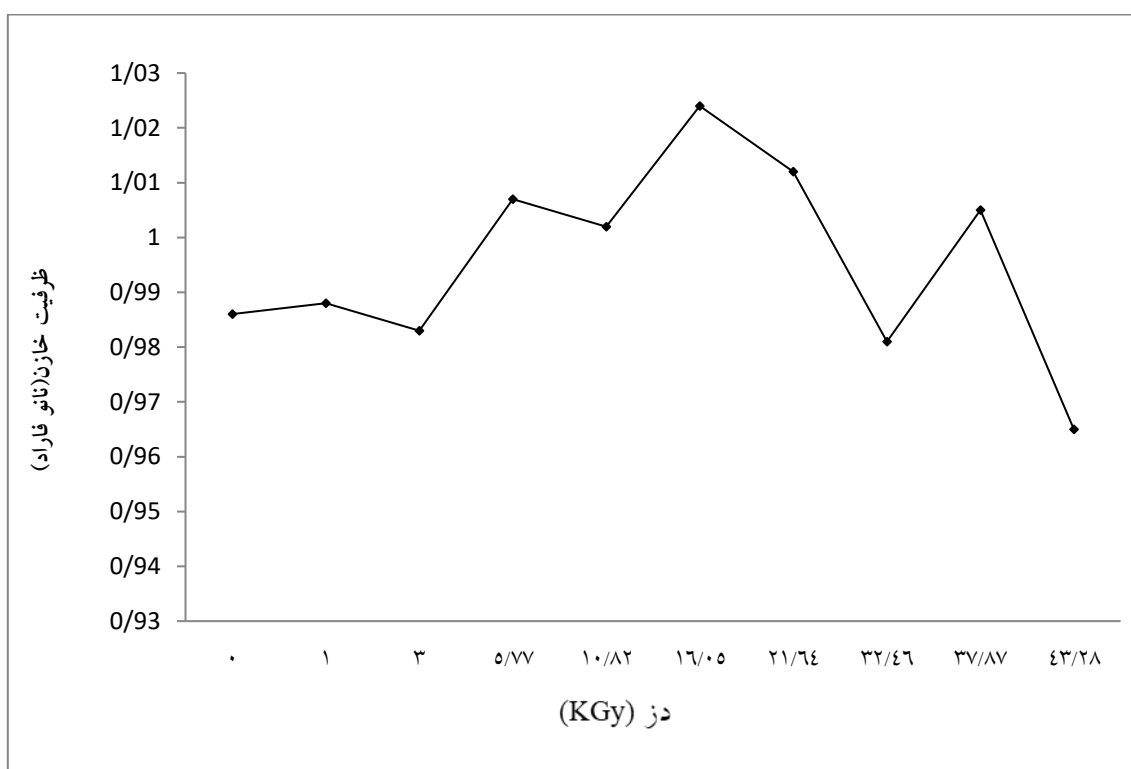
طبق آزمایشات مشخص شد که مقدار ظرفیت خازنهای الکترولیتی بعد از پرتودهی هیچگونه تغییری نمی‌کند. اما مقدار و تغییرات ظرفیت خازنهای پلی‌استر (PM105j(1nF), 2A102K(1μF) طبق مقدار دزهای مشخص شده در جدول ۶ و ۷ و شکل ۱۵-۱۲ نشان داده شده است.

جدول (۶) مقدار و تغییرات ظرفیت خازن PM105j تحت پرتودهی الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

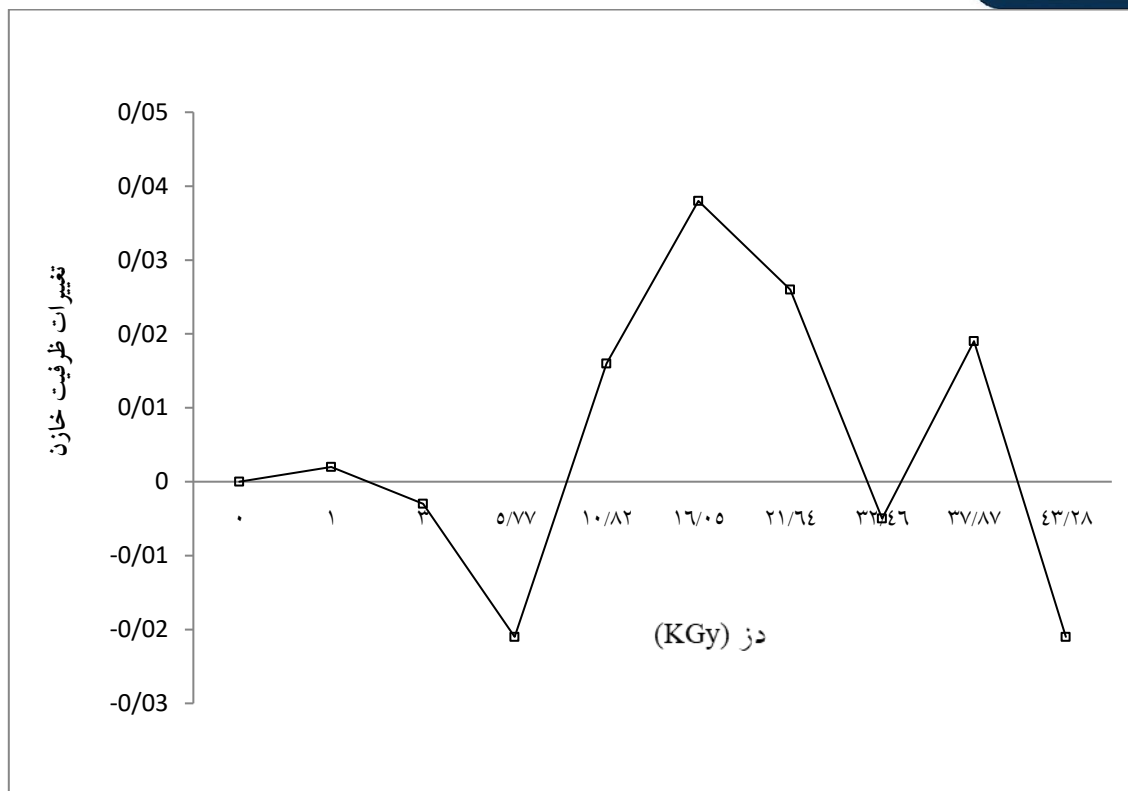
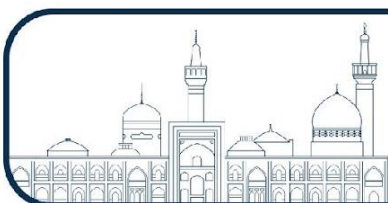
ردیف	دز پرتودهی (KGy)	ظرفیت خازن (C)	تغییرات ظرفیت خازن (ΔC)
۱	۰	۱/۱۰۷	۰
۲	۱	۱/۱۱۷	۰/۰۱
۳	۳	۱/۱۲۵	۰/۰۱۸
۴	۵/۷۷	۱/۱۱	۰/۰۰۳
۵	۱۰/۸۲	۱/۱۰۵	-۰/۰۰۲



۰/۰۰۵	۱/۱۱۲	۱۶/۰۵	۶
-۰/۰۲۲	۱/۰۸۵	۲۱/۶۴	۷
۰/۰۰۳	۱/۱۱	۳۲/۴۶	۸
-۰/۰۰۳	۱/۱۰۴	۳۷/۸۷	۹
-۰/۰۳۴	۱/۰۷۳	۴۳/۲۸	۱۰

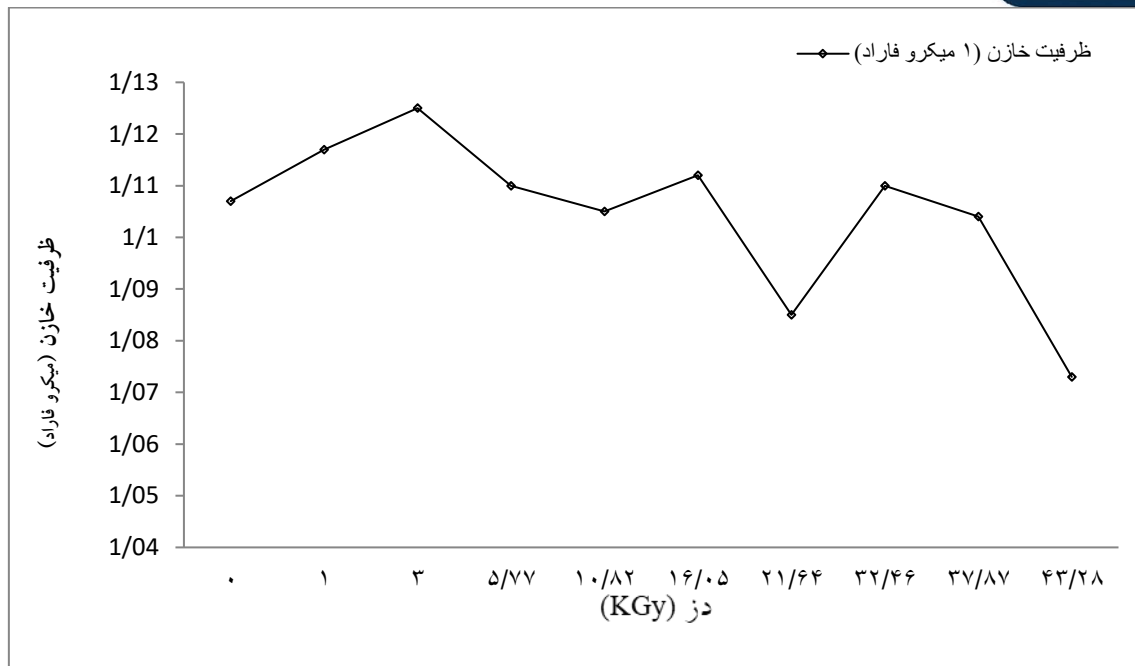


نمودار (۱۲) ظرفیت خازن $PM_{10.5}$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دوز تابشی.

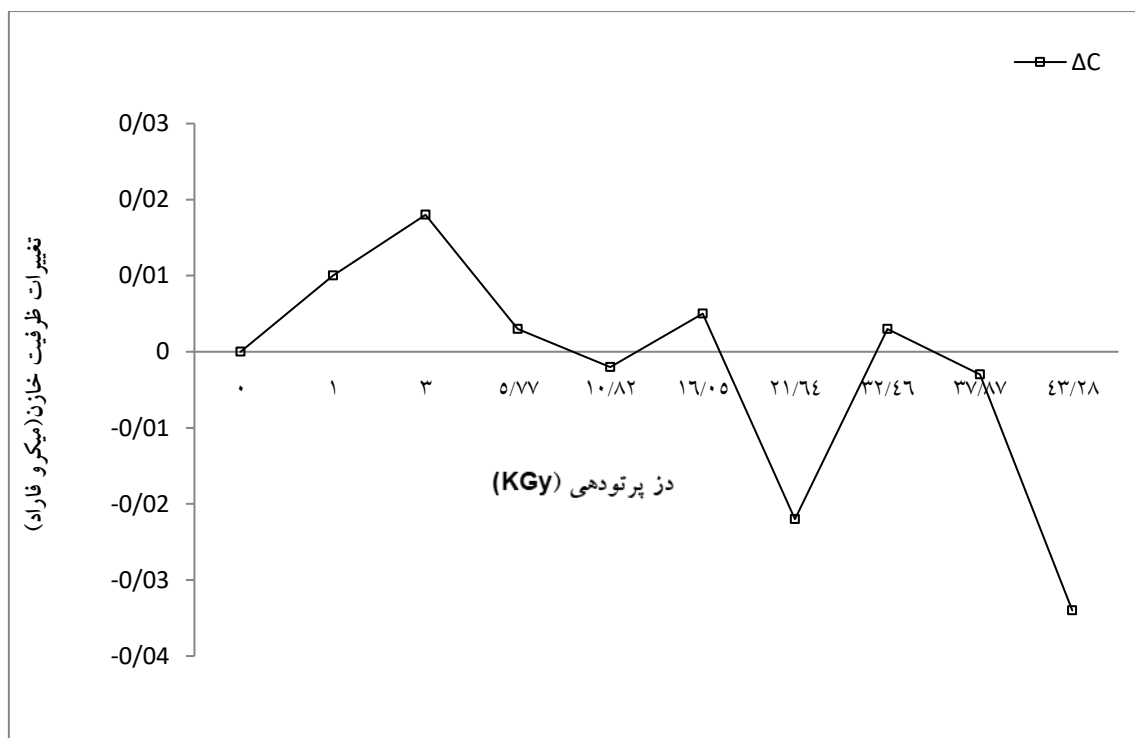


شکل (۱۳) تغییرات ظرفیت خازن $PM_{10.5}$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.
جدول (۷) مقدار و تغییرات ظرفیت خازن $2A10.2K$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

ردیف	دوز تابشی (KGy)	ظرفیت خازن (C)	تغییرات ظرفیت خازن (ΔC)
۱	۰	۰/۹۸۶	۰
۲	۱	۰/۹۸۸	۰/۰۰۲
۳	۳	۰/۹۸۳	-۰/۰۰۳
۴	۵/۷۷	۱/۰۰۷	-۰/۰۲۱
۵	۱۰/۸۲	۱/۰۰۲	۰/۰۱۶
۶	۱۶/۰۵	۱/۰۲۴	۰/۰۳۸
۷	۲۱/۶۴	۱/۰۱۲	۰/۰۲۶
۸	۳۲/۴۶	۰/۹۸۱	-۰/۰۰۵
۹	۳۷/۸۷	۱/۰۰۵	۰/۰۱۹
۱۰	۴۳/۲۸	۰/۹۶۵	-۰/۰۲۱



شکل (۱۴) ظرفیت خازن $2A102K$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.



شکل (۱۵) تغییرات ظرفیت خازن $2A102K$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز پرتودهی.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، بعد از بررسی نتایج پرتودهی‌ها مشاهده شد که رفتار پرتوهای الکترون دستگاه شتاب‌دهنده رودوترون بر مؤلفه عرض ناحیه تهی تأثیر گذاشته و در نتیجه حامل‌های اقلیت و حامل‌های اکثریت در تولید جریان کلکتور و جریان بیس را متأثر

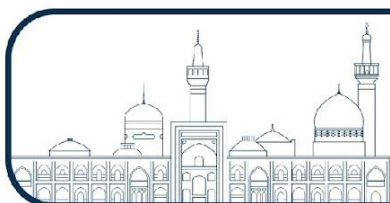


نموده و با توجه به نتایج حاصل که در قسمت نتایج نشان داده شده است از میان نمودار ترانزیستورهای PNP، مدل BC327- ۴۰ بهترین رفتار را دارد که این ترانزیستورها در دسته ترانزیستورهای نیمه قدرت قرار دارند و پهنای نیمه‌هادی‌های N و P به کار رفته در ساختمان داخلی آن عریض‌تر و حجیم‌تر است و تغییرات بهره جریان نسبت به تغییرات دز پرتو تابشی، به صورت خطی تغییر می‌کند. بر اساس یافته‌های پژوهش نتیجه می‌گیریم که مشخصه ورودی و خروجی ولتاژ-جریان ترانزیستور با تغییرات دز پرتو دهی تغییر می‌کند.

ظرفیت خازن‌های الکترولیتی بعد از پرتو دهی تغییر نمی‌کند اما ظرفیت خازن‌های پلی‌استر به دلیل وجود ماده عایق پلی‌استر درون آن بعد از پرتو دهی تغییر می‌نماید.

۵- مراجع:

- [۱] Chee Fuei Pien, Haider F. Abdul Amir, Saafie, Azali Muhammad, Effects of Total Ionizing Dose On Bipolar Junction Transistor, American Jurnal, of Applied Sciences, ۷ (۶), ۸۰۷-۸۱۰, ۲۰۱۰.
- [۲] R.L. Boylestad, L. Nashelsky, Electronic Devices And Circuit Theory, Pearson Prentice Hall, ۲۰۰۶.
- [۳] Polyakov. A. Y., Lee. H., ۱۰ MeV electrons irradiation effects in variously doped N-Gan.
- [۴] Gopalakrishna. N., shashidhara. B., ۲۰۱۳, Archives of Physics Research, The effect of electron irradiation on BJTs and Mosfets at elevated temperatures, ۰۹۷۶-۰۹۷۰.
- [۵] Monte, D. S., & Santos, L. A. P. (۲۰۲۰). A method for measuring ionizing radiation dose by analyzing hybrid- π parameters of transistors. Instrumentation and Measurement Technology Conference, ۱-۶.
- [۶] Santos, L. A. P. (۲۰۲۲). An Overview on Bipolar Junction Transistor as a Sensor for X-ray Beams Used in Medical Diagnosis. Sensors, ۲۲(۵), ۱۹۲۳.
- [۷] Santos, L. A. P., Cavalcanti, F. A., Nobrega, G. S., Monte, D. S., Araujo, G. G., Alves, A. N., Silva, J. O., & Santos, M. A. P. (۲۰۱۳). Techniques for measuring some characteristics of ionizing radiation beams using bipolar junction transistor as a detector. International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and Their Applications, ۱-۵.
- [۸] Fuochi, P. G., Corda, U., Gombia, E., & Lavallo, M. (۲۰۰۶). Influence of radiation energy on the response of a bipolar power transistor tested as dosimeter in radiation processing. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, ۵۶۴(۱), ۵۲۱-۵۲۴.
- [۹] Filho, L. C., & Santos, L. A. P. (n.d.). An electronic dosimeter for diagnostic X-ray beams based on a differential amplifier circuit with MOSFETs. Epj Web of Conferences.
- [۱۰] Wrobel, T. F., & Berger, R. A. (۱۹۷۵). Silicon Calorimeter System for Gamma and Electron-Beam Radiation Dosimetry. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 22(۶), ۲۳۱۴-۲۳۱۸.



بررسی پاسخ فیلم دزیمترهای پلیمری ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوها با استفاده از

نشانگر بروموکرسل گرین (کد مقاله : ۱۲۱۲)

رضاییان، پیمان* - سلیمانینیا، معصومه - اخوان، اعظم - صدیقه کاشیان

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

در این مقاله پاسخ فیلم دزیمترهای پلیمری ساخته شده با استفاده از نشانگر بروموکرسل گرین در دزهای کمتر از 1 kGy بررسی شد. دزیمتر ساخته شده بر پایه پلی وینیل بوتیرال (PVB) حاوی ماده رنگی بروموکرسل گرین (BCG) و نمک کلرال هیدرات (CH) است. پاسخ این دزیمتر با تغییر جذب در طول موج 626 nm نانومتر پس از پرتودهی، سنجیده میشود. به صورت شهودی رنگ فیلم ساخته شده در اثر پرتو، از سبز تیره به زرد تغییر مییابد. محدوده عملکردی مناسب دزیمتر ساخته شده در بازه دزهای 100 تا 1000 Gy است. بیشینه عدم قطعیت آماری دزیمترهای ساخته شده 5% است. نتایج نشان میدهد که میان دز نشان داده شده توسط این دزیمترها و دز اسمی ناشی از پرتودهی انجام شده در گاماسل همخوانی قابل قبولی وجود دارد. با توجه به محدودیتهایی که در زمینه تولید و تهیه دزیمترهای دز میانی وجود دارد این دزیمتر میتواند در پرتوآوری محصولات کشاورزی بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: دزیمترفیلمی، پرتودهی، دز جذبی، پرتوآوری محصولات کشاورزی

Investigation of the Fabricated Polymeric Film Dosimeter in Radiation Applications School using Bromocresol Green Indicator

Rezaeian, Peiman, Soleimani nia, Masume, Akhavan, Azam, Sedigheh Kashian

Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute,
Radiation Application Research School

Abstract:

In this paper, the response of the polymeric film dosimeter fabricated using Bromocresol Green indicator was studied in absorbed dose less than 1 kGy . Fabricated dosimeter is based on Polyvinyl Butyral (PVB). It also, contains bromocresol green and Chloral Hydrate (HC) salt. Response of this dosimeter after radiation is evaluated by net absorption variations in wavelength of 626 nm . The color of the film due to irradiation is changed from green to yellow. The Suitable dose range of the fabricated dosimeter is 100 to 1000 Gy . The maximum statistical uncertainty of this dosimeters is 5% . The results reveal that the readout absorbed dose by these dosimeters is in agreement with irradiation performed in Gammacell. Due to limits of low dose dosimeters this dosimeter is fabricated to use in radiation processing of the agricultural products.

Key words: Film dosimeter, Irradiation, Absorbed dose, Radiation Processing of Agricultural Products



۱- مقدمه:

پرتوفاوری یک صنعت رو به رشد با کاربردهای گسترده می‌باشد که تاکنون رشد تجاری چشمگیری داشته است. کاربردهای صنعتی پرتوفاوری مانند پرتودهی مواد غذایی، سترونسازی مواد بهداشتی و پزشکی، تصفیه فاضلاب‌های صنعتی، جلوگیری از جوانه زدن و کنترل و یا ریشه‌کنی آفات مواد غذایی، فراوری مواد پلیمری جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی با استفاده از پرتوهای یونساز صورت می‌گیرد [۱]، [۲]. از پرکاربردترین حوزه‌های پرتوفاوری، در زمینه محصولات کشاورزی است که به منظور بهینه‌سازی خواص فیزیولوژیکی، دفع آفات و همچنین افزایش زمان انبارمانی محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از چالش‌های مهم بخش کشاورزی، میزان ضایعات بسیار بالا در مراحل پس از برداشت تا مصرف محصولات است. به عنوان مثال، مجموع ضایعات گندم در کشور در مراحل پس از برداشت ۳۰ درصد حجم تولیدی را شامل می‌شود که در صورت کاهش این حجم ضایعات می‌توان از میزان وابستگی به واردات این محصول کاست [۳]. یک رویکرد مؤثر برای افزایش انبارمانی محصولات کشاورزی در سالهای اخیر، پرتودهی آنها است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است. عمده دز مورد نیاز در حوزه پرتوفاوری محصولات کشاورزی کمتر از ۱ kGy است [۴]. رسیدن به نتیجه دلخواه زمانی حاصل می‌شود که دز مورد نیاز به نمونه مورد نظر داده شده باشد. چنانچه میزان دز جذب شده در نمونه کمتر از مقدار مشخص شده باشد، کارایی لازم را نخواهد داشت و در صورتی که دز دریافتی بیشتر از مقدار مشخص شده باشد، اثرات مخربی بر روی محصول برجا خواهد گذاشت. از این رو، فرآیند کنترل کیفی در پرتوفاوری به منظور حصول اطمینان از مقدار دز جذب شده توسط محصول اهمیت بسزایی دارد. بدین منظور، سعی می‌شود تا از سیستم‌های دزیمتری با صحت و دقت بالا در اندازه‌گیری استفاده شود. معمولاً تعداد دزیمترهای قابل استفاده در ناحیه دز جذبی برای محصولات کشاورزی (کمتر از ۱ kGy) بسیار محدود می‌باشد [۵]. در نواحی بالاتر دز معمولاً از دزیمترهای شیمیایی، پرسپکس، آلانین و اتانول کلروبنزن استفاده می‌شود. بررسی دزیمترها و ناحیه دزیمتری آنها نشان می‌دهد، دزیمترهای زیادی برای این محدوده مذکور از پرتوفاوری محصولات کشاورزی وجود ندارد و برای موارد موجود نیز اکثراً دستیابی به آنها در داخل کشور به دلایل مسائل مربوط به تحریمها، قیمت بالا و در دسترس نبودن سیستم قرائت امکان پذیر نمی‌باشد. لذا نیاز به یک دزیمتر قابل اعتماد، ارزان قیمت، با قابلیت ساخت آسان و سیستم قرائت در دسترس، جهت استفاده در دزیمتری روزانه محصولات کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. با این توضیحات، در این مقاله پاسخ دزیمتر پلیمری فیلمی ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوها در محدود دز جذبی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ گری مورد بررسی قرار گرفته است. از این دزیمتر می‌توان برای کنترل کیفی فرآیند پرتوفاوری محصولات کشاورزی استفاده کرد.

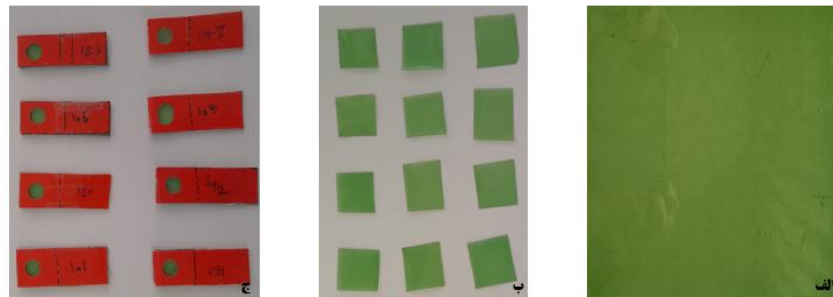
۲- روش کار:

دزیمترهای پلیمری فیلمی رادیوکرومیک، رایجترین دسته از دزیمترهای روتین هستند که به طور گسترده‌ای برای مانیتورینگ دز جذبی در سامانه‌های پرتودهی الکترون و گاما مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس این دزیمترها بر مبنای تغییر رنگ آنها در اثر پرتو با توجه به مقدار دز جذب شده است. این فیلمها به دلیل خواصی همچون دانسیته پایین، هزینه ساخت نسبتاً پایین و قابلیت تبدیل شدن به شکلهای پیچیده همواره مورد توجه بوده‌اند [۶].

به منظور ساخت دزیمتر ابتدا محلول stock بروموکرسل گرین با انحلال این نشانگر در ۱/۲ میلیلیتر از محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۰/۱ مولار تهیه و سپس حجم محلول حاصل با اتانول به ۵۰ میلیلیتر رسانده شد. برای تهیه فیلم با ضخامت مناسب، مقدار ۱۲/۵ گرم پلی وینیل بوتیرال در ۲۵۰ میلیلیتر بوتانول بر روی همزن مغناطیسی به طور کاملاً یکنواخت حل به



صورتی که محلولی شفاف حاصل شد. جهت تهیه فیلم مناسب برای دزیمتری، محلول بروموکرسل گرین، پلی وینیل بوتیرال و نمک کلرال هیدرات ترکیب و فیلمها به روش casting در آزمایشگاه تهیه شدند. در این روش، برای تهیه فیلمهایی با ضخامت یکسان، یکنواختی محلول دزیمتری و قرار دادن آن در محلی کاملاً تراز شده بسیار حائز اهمیت است. پس از خشک شدن، فیلمها در ابعاد $1/2 * 1/2$ سانتیمتر مربع بریده شدند و برای پرتودهی و قرائت درون نگهدارندهایی مطابق با شکل قرار داده شدند (شکل (۱)).

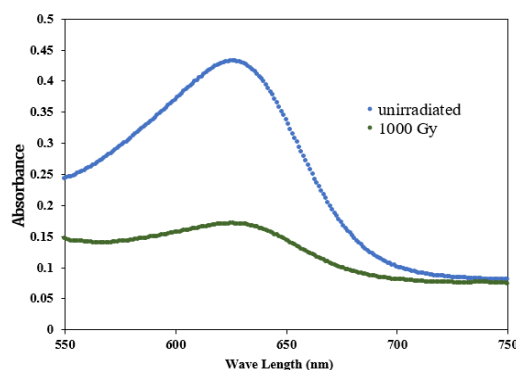


شکل (۱)- الف: فیلم ساخته شده قبل از برشکاری، ب: فیلمهای برش داده شده. ج: نگهدارندهای کاغذی ساخته شده جهت قرار دادن فیلمها درون سامانه پرتودهی و قرائت با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر.

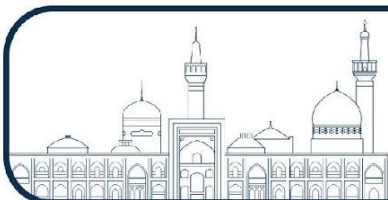
پس از آماده‌سازی فیلمها، پرتودهی آنها به منظور اطمینان از صحت عملکردشان در قالب دزیمتر انجام شد. پرتودهی توسط سیستم گاماسل ^{60}Co مدل GC-۲۲۰ ساخت شرکت NORDION موجود در آزمایشگاه سیستمهای پرتودهی پژوهشکده کاربرد پرتوها انجام شد. کالیبراسیون گاماسل به طور دوره‌ای توسط دزیمتر مرجع فریک انجام میشود [۷]. خوانش فیلمهای تهیه شده در این پروژه با اندازه‌گیری میزان جذب نوری آنها قبل و پس از پرتودهی، با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر BECKMAN Coulter-Du ۸۰۰ موجود در آزمایشگاه سیستمهای پرتودهی پژوهشکده کاربرد پرتوها و در محدوده طول موج نور مرئی از ۸۰۰-۳۰۰ nm انجام شد.

۳- نتایج:

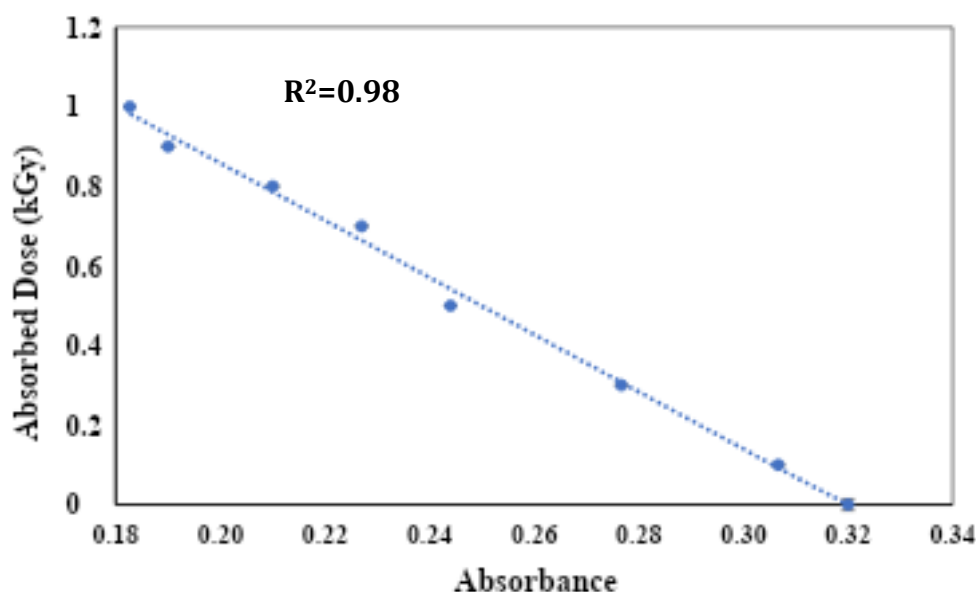
به منظور تعیین پاسخ دزیمترها بیناب جذبی فیلم دزیمترهای ساخته شده در محدوده طول موج مرئی ۸۰۰-۳۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر ثبت شد. بیناب ثبت شده برای نمونههای پرتودهی نشده و دز جذبی ۱۰۰۰ گری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲)- بیناب جذبی فیلم دزیمترهای ساخته شده.



همانطور که در شکل (۲) مشاهده میشود، با پرتو دهی میزان جذب در قله با طول موج ۶۲۶ نانومتر کاهش مییابد. که از این کاهش میتوان به عنوان معیاری جهت انجام دزیمتری استفاده کرد. بدین منظور سه فیلم در دزهای ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ کیلوگری پرتو دهی شدند. در شکل (۳) منحنی کالیبراسیون دزیمترهای (دز جذبی به صورت تابعی از میزان جذب) نشان داده شده است. در این شکل بیشینه عدم قطعیت جذب اندازه‌گیری شده ۵٪ است.



شکل (۳)- منحنی کالیبراسیون فیلم دزیمترهای ساخته شده.

معادله کالیبراسیون فیلم دزیمترهای ساخته شده، عبارت خواهد بود از :

$$Dose[kGy] = (-7.14) \times (Absorbance) + (2.29) \quad (1)$$

با استفاده از رابطه فوق میتوان با استفاده از میزان جذب، دز جذبی فیلم را به دست آورد.

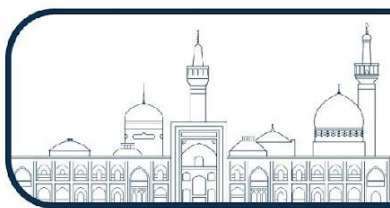
به منظور ارزیابی پاسخ، دزیمترها در میدان پرتوی کبالت-۶۰ با دزهای مشخص پرتو دهی و سپس مقدار بدست آمده از منحنی کالیبراسیون با مقادیر اسمی مقایسه شدند.

با توجه به اینکه در این ارزیابی مقدار عدم قطعیت، حائز اهمیت میباشد، محاسبات مربوطه انجام شد. با توجه به اینکه مقادیر دز جذبی با استفاده از رابطه (۱) بدست میآید، منشا عدم قطعیت در این پارامتر ناشی از عدم قطعیت در مقدار جذب میباشد که به صورت زیر نوشته میشود

$$U_{Ab} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2)$$

در این رابطه U_A و U_B عدم قطعیت آماری و عدم قطعیت سیستماتیک هستند که به شرح زیر برای فیلمها تعیین شدند.

برای تعیین عدم قطعیت آماری در هر دز ۵ فیلم تهیه و پرتو دهی و مقدار انحراف معیار برای این فیلمها محاسبه شد. بیشینه انحراف معیاری مشاهده شده برای فیلمها در فاکتور پوششی ۱ برابر با ۵٪ گزارش شد. عدم قطعیت سیستماتیک مربوط به ابزار



آزمایشگاه و ترازوی دیجیتال است. بر اساس گواهیهای کالیبراسیون، خطای تجهیزات شیشه‌ای مورد استفاده ۰/۸٪ و خطای ترازوی شیشه‌ای مورد استفاده نیز ۰/۱٪ است. با توجه به تأثیر غلظتها در میزان جذب، مقادیر عدم قطعیت در تجهیزات شیشه‌ای و ترازو، اثرات خود را در مقدار جذب دزیمتر نشان دهند که این خطا به صورت خطی در نظر گرفته شده است. مورد بعد در عدم قطعیت سیستماتیک دستگاه جذب نوری است. بر اساس گواهی کالیبراسیون دستگاه مورد استفاده، مقدار این عدم قطعیت ۱٪ است. بودجه‌بندی مقادیر عدم قطعیت در جدول (۱) نشان داده شده است.

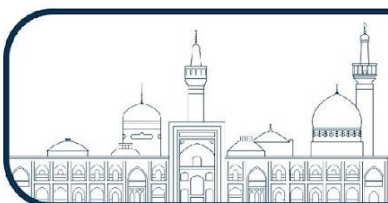
جدول (۱)- بودجه بندی عدم قطعیت در فیلم دزیمترهای ساخته شده

منشأ عدم قطعیت	نوع A (%)	نوع B (%)
تجهیزات شیشه ای	-	۸/۰
ترازوی دیجیتال	-	۱/۰
اسپکتروفتومتر	-	۱
بیشینه تکرار پذیری جذب	۵	-
عدم قطعیت کل جذب نوری (%)	۱۶/۵	

با استفاده مقادیر جدول (۱) میزان عدم قطعیت جذب اندازه‌گیری تعیین و با بهره‌گیری از قانون انتشار خطا و رابطه (۱) دز جذبی و عدم قطعیت آن مطابق با جدول (۲) محاسبه شد.

جدول (۲)- بررسی پاسخ دزیمترهای ساخته شده

دز تخمین زده شده (گری)	میانگین مقدار اندازه گیری جذب	دز اسمی (گری)
$18/103 \pm 00/290$	۲۸/۰	$00/6 \pm 00/300$
$44/88 \pm 40/576$	۲۴/۰	$00/10 \pm 00/500$
$76/84 \pm 80/677$	۲۳/۰	$00/14 \pm 00/700$
$33/66 \pm 06/790$	۲۱/۰	$00/16 \pm 00/800$
$39/77 \pm 40/933$	۱۹/۰	$00/18 \pm 00/900$
$02/70 \pm 80/1004$	۱۸/۰	$00/20 \pm 00/1000$



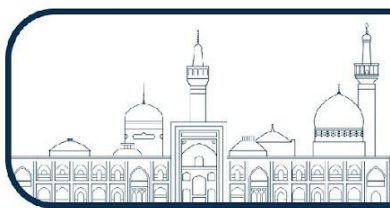
لازم به ذکر است که در محاسبات جدول (۲) بیشینه مقدار عدم قطعیت آماری در نظر گرفته شده است و در عمل در بسیاری از موارد عدم قطعیت آماری پایین تر از ۵٪ (حدود ۲٪) است. البته عدم قطعیت در دز ۳۰۰ گری حدود ۳۵٪ است. این مقدار بالا می‌باشد و در پژوهشهای بعدی تلاش میشود که روشهای فیلم افزایش و در نتیجه این عدم قطعیت کاهش یابد. همچنین عدم قطعیت دز اسمی (۲٪) ناشی از کالیبراسیون دستگاه گاماسل است. کالیبراسیون گاماسل-۲۲۰ بر اساس دزیمتر استاندارد فریک [۷] انجام میشود. دادههای جدول (۲) نشان میدهد که مقادیر دز تخمین زده شده توسط فیلم دزیمترها با مقادیر اسمی همخوانی دارد.

۴- بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، با توجه به نیاز کشور و محدود بودن دزیمترهای ارزان قیمت و با قابلیت ساخت آسان در محدوده دزهای کمتر از ۱۰۰۰ Gy، جهت پرتوآوری محصولات کشاورزی بررسی پاسخ فیلم دزیمترهای پلیمری ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوها بر پایه پلی وینیل بوتیرال (PVB) انجام شد. بهترین ناحیه به کارگیری فیلمهای پلیمری ساخته شده که متشکل از ماده رنگی BCG و نمک کلرال هیدرات (CH) میباشد، محدوده دز ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ گری برآورد شده است. رنگ این فیلمها در اثر پرتودهی با پرتوهای گامای از سبز تیره به زرد تغییر مییابد که حاکی از تغییر مقدار جذب نوری است. طول موج بیشینه این دزیمتر در ۶۲۶ نانومتر است. با رسم نمودار تغییرات میزان جذب نوری به ازای دزهای مختلف، نمودار پاسخ دزیمتر به دست آورده شد. با استفاده از این نمودار و اندازهگیری مقدار جذب دزیمتر، دز جذبی محصول قابل حصول است و مقادیر دز گزارش شده با دز اسمی همخوانی قابل قبولی دارد. در بیشینه مقدار عدم قطعیت آماری این دزیمترهای ۵٪ است.

۵- مراجع:

- [۱] L.B. Gordan, J.H. Gerald, "Radiation Dosimetry", Boston, Massachuset, ۱۹۵۶.
- [۲] H. Fricke, E.J. Hart, "Chemical dosimetry. In: In: Attix, H., Roesch, W. (Eds.), Radiation Dosimetry", Vol. II, Instrumentation. Academic Press, London, pp. ۱۶۷-۲۳۲, ۱۹۶۹.
- [۳] W.L. McLaughlin, "Radiochromic dye-cyanide dosimeters. In: Holm, N.W., Berry, R.J. (Eds.), Manual on Radiation Dosimetry. Dekker, New York, pp. ۳۷۷-۳۸۵, ۱۹۷۰.
- [۴] H.M. Khan, W.L. McLaughlin, "Gamma-ray dosimetry by spectrofluorometry of phenyl acetic acid solution". Int. J. Radiat. Appl. Instrum, Part C Radiat. Phys. Chem. ۲۹(۳), ۲۴۳-۲۴۸. ۱۹۹۲.
- [۵] M.F. Barakat, K. El-Salamawy, M. El-Banna, M. Abdel-Hamid, and A. Taha. "Radiation effects on some dyes in non-aqueous solvents and in some polymeric Films". Radiat. Phys. Chem. ۶۱(۲): ۱۲۹-۱۳۶, ۲۰۰۱.
- [۶] Engel, Laura, Ismael Benito-Altamirano, Karina R. Tarantik, Carolin Pannek, Martin Dold, J. Daniel Prades, and Jürgen Wöllenstein. "Printed sensor labels for colorimetric detection of ammonia, formaldehyde and hydrogen sulfide from the ambient air." Sensors and Actuators B: Chemical ۳۳۰ (۲۰۲۱): ۱۲۹۲۸۱.
- [۷] ASTM E ۱۰۲۷, "Standard practice for using the Fricke reference-standard dosimetry system.", ۲۰۰۶.



تحلیل و بررسی عملکرد حفاظتی لنزهای عینک در برابر پرتوهای یونیزه‌کننده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (کد مقاله: ۱۲۱۷)

محرابی، محسن^{۱*} - سالک، نفیسه^۲ - بیگ زاده، امیرمحمد^۱

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها
۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای

چکیده:

چشم یکی از بافت‌های حساس به پرتوهای یونیزه‌کننده است و قرار گرفتن در معرض پرتوها می‌تواند باعث ایجاد تاری دید، آب مروارید و از دست دادن بینایی شود. در دهه اخیر، حساسیت چشم به پرتوهای یونیزه‌کننده مورد توجه قرار گرفته است. با کاهش حد دز معادل عدسی چشم توسط *ICRP*، انتخاب لنزهای عینک با ویژگی‌های حفاظتی مناسب اهمیت یافته است. در این مطالعه، ویژگی‌های حفاظتی مواد لنزهای عینک در برابر پرتوهای فوتونی، پروتون (^1H) و آلفا (^2He) با استفاده از کد مونت کارلو *MCNP* و نرم‌افزار *SRIM* بررسی شد. نتایج نشان داد که لنز *CR-۳۹* کم‌ترین مقادیر ضخامت نیم لایه (*HVL*)، ضخامت یک دهم لایه (*TVL*) و مسیر آزاد میانگین (*MFP*) را دارد. همچنین، مقادیر توان توقف جرمی (*MSP*) و برد پیش‌بینی شده (*PR*) برای ذرات پروتون و آلفا در محدوده انرژی ۰/۰۱ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت محاسبه شد. نتایج تأیید کرد که *CR-۳۹* کم‌ترین مقادیر *PR* را دارد و بهترین عملکرد حفاظتی را در برابر پرتوها ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: حفاظت در برابر پرتو، لنز عینک، شبیه‌سازی مونت کارلو، توان توقف جرمی، ضخامت نیم لایه.

Investigating the Radiation-Shielding Capabilities of Eyeglass Lenses Through Advanced Monte Carlo Simulation Methods

Mehrabi, Mohsen^{۱*}, Salek, Nafise^۲, Beigzadeh, Amir Mohammad^۱

۱. Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School

۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Nuclear Fuel Research School

Abstract:

The eye is one of the tissues sensitive to ionizing radiation, and exposure to radiation can lead to blurred vision, cataracts, and vision loss. In recent decades, the sensitivity of the eye to ionizing radiation has gained significant attention. With the reduction of the equivalent dose limit for the eye lens by the ICRP, the selection of eyeglass lenses with appropriate protective properties has become increasingly important. In this study, the protective characteristics of eyeglass lens materials against photon radiation, protons (H^1), and alpha particles (He^{+2}) were



investigated using the Monte Carlo code MCNP and the SRIM software. The results demonstrated that CR-۳۹ lenses exhibit the lowest values of half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), and mean free path (MFP). Additionally, the mass stopping power (MSP) and projected range (PR) for protons and alpha particles were calculated within the energy range of ۰.۰۱ to ۱۰ MeV. The results confirmed that CR-۳۹ has the lowest PR values and provides the best protective performance against radiation.

Key words: Radiation protection, Eyeglass lens, Monte Carlo simulation, Mass stopping power, Half-value layer

۱ - مقدمه:

لنزهای عینک یکی از اساسی‌ترین نیازها برای بهبود کیفیت زندگی افراد دارای مشکلات بینایی هستند. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت^{۵۳} (WHO)، حداقل ۱ میلیارد از حدود ۲/۲ میلیارد نفر در جهان دارای اختلال بینایی هستند که قابل پیشگیری یا درمان است [۱]. این وضعیت تقاضا برای لنزهای عینک را افزایش داده است. اهمیت استفاده از لنزهای عینک در گروه‌های سنی مختلف و افرادی که تنها با یک چشم قادر به دیدن هستند، بیشتر شده است. همچنین، لنزهای عینک نه تنها توسط افراد دارای مشکلات بینایی، بلکه توسط کاربران عینک‌های آفتابی نیز استفاده می‌شوند. در این مطالعه، ویژگی‌های حفاظتی مواد لنزهای عینک (CR-۳۹، پلی‌کربنات و تری‌وکس) بررسی شده است. این لنزها به دلیل ساختار شیمیایی و ترکیبات مواد، سبک‌تر و مقاومت ضربه‌ای بالاتری نسبت به سایر لنزها دارند. لنز CR-۳۹ توسط شرکت صنایع پی‌پی‌جی^{۵۴} توسعه یافته و به‌عنوان آلکیل دی‌گلیکول کربنات نیز شناخته می‌شود و در برابر خراش، گرما و مواد شیمیایی مقاوم است [۲-۴]. لنز پلی‌کربنات توسط شرکت جنرال الکتریک^{۵۵} توسعه یافته و مزایایی مانند چگالی کم، مقاومت ضربه‌ای بالا و عدد آبه^{۵۶} بالاتر نسبت به CR-۳۹ دارد [۵]. لنز تری‌وکس نیز از پلی‌اورتان ساخته شده و سبک‌تر از CR-۳۹ و پلی‌کربنات است [۲، ۶].

حساسیت چشم به پرتوهای یونیزه‌کننده در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. کمیسیون بین‌المللی حفاظت پرتوی^{۵۷} (ICRP) در سال ۲۰۱۱ حد دز معادل عدسی چشم برای مواجهه شغلی را از ۱۵۰ به ۲۰ میلی‌سیورت کاهش داد [۷]. این محدودیت در سال ۲۰۱۸ در قوانین ملی کشورهای اتحادیه اروپا اجرایی شد. کمیسیون دزیمتری پرتوهای هلند^{۵۸} (NCS) نیز در گزارش خود بر لزوم نظارت بر مواجهه عدسی چشم با پرتو و تعیین گروه‌های کارگری که نیاز به نظارت دارند، تأکید کرد

^{۵۳} World Health Organization

^{۵۴} Pittsburgh Plate Glass

^{۵۵} General Electric

^{۵۶} Abbe

^{۵۷} International Commission on Radiological Protection

^{۵۸} Netherlands Commission on Radiation Dosimetry



[۸]. این محدودیت‌ها بسته به نوع لنز عینک و موارد استفاده متفاوت است. در این مطالعه، ویژگی‌های حفاظتی لنزهای عینک در برابر پرتوهای فوتونی، پروتون (^1H) و آلفا (^2He) بررسی شد.

در سال‌های اخیر، روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت کارلو برای بررسی ویژگی‌های حفاظتی مواد در برابر پرتوها استفاده شده‌اند. کدهای مونت کارلو مانند Geant^{۵۹}، FLUKA^{۶۰}، MCNP^{۶۱} و PENELOPE به‌طور گسترده در این زمینه به کار می‌روند. این روش‌ها انتقال فوتون‌های پرتو گاما و برهمکنش آن‌ها با ماده را شبیه‌سازی می‌کنند. در این مطالعه، پارامترهای حفاظتی مانند ضریب تضعیف جرمی ($\text{MAC}^{۵۹}$)، ضخامت نیم لایه ($\text{HVL}^{۶۰}$)، ضخامت یک دهم لایه ($\text{TVL}^{۶۱}$) و مسیر آزاد میانگین^{۶۲} (MFP)، برای لنزهای عینک محاسبه شدند. این پارامترها با استفاده از پرتوهای گاما در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت تعیین شدند. علاوه بر این، مقادیر برد پیش‌بینی شده^{۶۳} (PR) و توان توقف جرمی^{۶۴} (MSP) برای ذرات پروتون و آلفا در محدوده انرژی ۰/۰۱ تا ۱۰ مگاالکترون‌ولت با استفاده از کد SRIM محاسبه شد. کد SRIM در تحقیقات کاشت یونی و علوم مواد پرتویی بسیار محبوب است [۹].

نتایج این مطالعه نشان داد که لنز ۳۹-CR کم‌ترین مقادیر HVL، TVL و MFP را دارد و بهترین عملکرد حفاظتی را در برابر پرتوها ارائه می‌دهد. همچنین، مقادیر PR و MSP برای ذرات پروتون و آلفا تأیید کرد که ۳۹-CR کم‌ترین مقادیر PR را دارد. این نتایج نشان می‌دهد که ۳۹-CR بهترین گزینه برای حفاظت از چشم در برابر پرتوهای یونیزه‌کننده است.

۲ - روش کار:

در این مطالعه، ویژگی‌های حفاظتی لنزهای عینک (۳۹-CR، پلی‌کربنات و تری‌وکس) مورد بررسی قرار گرفت. دلیل بررسی لنزهای ۳۹-CR، پلی‌کربنات و تری‌وکس در این مطالعه این است که این لنزها از جمله انواع لنزهایی هستند که نسبت به لنزهای دیگر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۱]. دلایل ترجیح لنزهای پلی‌کربنات و تری‌وکس توسط استفاده‌کنندگان عینک شامل سبک‌تر بودن، مقاومت بیشتر و داشتن ویژگی‌های محافظتی طبیعی در برابر اشعه ماوراء بنفش (UV) نسبت به سایر لنزها است. لنزهای ۳۹-CR ساده‌ترین شکل لنزهای پلاستیکی هستند و عدد آبه آن‌ها بالاترین است، که به معنای بهترین کیفیت نوری است. نقطه ضعف این لنزها این است که به راحتی خراش برمی‌دارند. با این حال، این مشکل را می‌توان با استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر خراش برطرف کرد [۱۱]. ویژگی‌های لنزهای عینک در جدول ۱ ارائه شده است [۲، ۳، ۶، ۱۲، ۱۳].

^{۵۹} Mass Attenuation Coefficient

^{۶۰} Half Value Layer

^{۶۱} Tenth Value Layer

^{۶۲} Mean Free Path

^{۶۳} Projected Range

^{۶۴} Mass Stopping Power



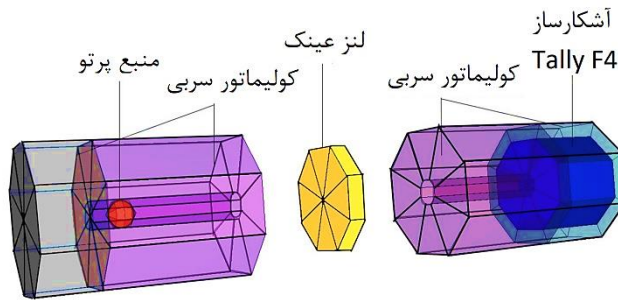
کد مونت کارلو MCNP یک برنامه شبیه‌سازی است که به‌طور گسترده توسط محققان در زمینه‌های مختلفی مانند فیزیک هسته‌ای، فیزیک انرژی بالا، فیزیک شتاب‌دهنده‌ها و فیزیک پزشکی استفاده می‌شود. در این مطالعه، برای محاسبه پارامترهای تضعیف پرتوهای لنزهای عینک، محدوده انرژی ۰/۳۵۶ تا ۱/۳۳ مگاالکترون‌ولت که به‌طور متداول برای مقادیر ضریب تضعیف جرمی استفاده می‌شود، به کار گرفته شد.

منبع پرتو به‌عنوان یک منبع نقطه‌ای ایزوتروپیک تعریف شد و جهت تعریف مواد مورد استفاده برای انواع لنز عینک در کد شبیه‌سازی MCNP، از درصدهای عنصری و چگالی مواد ارائه‌شده در جدول ۱ استفاده گردید.

جدول ۱: ویژگی‌های لنزهای عینک.

نام لنز (جنس ماده)	ضریب شکست	عدد آبه	چگالی (گرم بر سانتیمتر مکعب)	فرمول شیمیایی	ترکیب عنصری (درصد وزنی)
۳۹-CR (آلکیل دی‌گلیکول کربنات)	۱,۴۹	۵۸	۱,۳۲	$C_{12}H_{18}O_7$	۵۲/۵۵۱٪ کربن (C) ۶/۶۱۵٪ هیدروژن (H) ۴۰/۸۳۴٪ اکسیژن (O)
پلی کربنات (بیس فنول A)	۱,۵۹	۳۱	۱,۲۰	$C_{16}H_{14}O_3$	۷۵/۵۷۵٪ کربن (C) ۵/۵۴۹٪ هیدروژن (H) ۱۸/۸۷۶٪ اکسیژن (O)
تری‌وکس (پلی‌اورتان)	۱,۵۳	۴۳-۴۵	۱,۱۱	$C_{11}H_{18}N_2$	۷۴/۱۱۰٪ کربن (C) ۱۰/۱۷۶٪ هیدروژن (H) ۱۵/۷۱۴٪ نیتروژن (N)

نمونه‌های لنز عینک بین منبع پرتو و آشکارساز قرار داده شدند، به‌طوری که فاصله منبع پرتو و آشکارساز تا نمونه ۱۰ سانتیمتر باشد. فوتون‌های ساطع‌شده از منبع پرتو پس از عبور از نمونه‌ها به آشکارساز می‌رسند. برای جلوگیری از پراکندگی و افزایش دقت اندازه‌گیری، از کولیماتورهای سربی برای پوشش آشکارساز و منبع استفاده گردید. مراحل مختلفی برای انجام این محاسبات به‌دقت دنبال شد تا اطمینان حاصل شود که نتایج شبیه‌سازی دقیق و قابل اعتماد هستند. در شبیه‌سازی MCNP، شار فوتونی که می‌تواند از ماده عبور کند با تعریف تالی ^4F در ناحیه آشکارساز اندازه‌گیری شد و سپس محاسبات ضریب تضعیف جرمی با استفاده از داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی و قانون Beer-Lambert به‌دست آمد. با مقایسه اندازه‌گیری‌های MAC و نتایج نرم‌افزار WinXcom [۱۴]، و نیز محاسبه مقادیر اختلاف نسبی (RD) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی MCNP با نتایج حاصل از نرم‌افزار WinXcom، نتایج بدست آمده بررسی و تحلیل شد. شکل ۱ شبیه‌سازی MCNP برای محاسبات MAC را نشان می‌دهد.



شکل (۱) هندسه شبیه سازی شده در کد MCNP

اطلاعات مربوط به پارامترهای حفاظت پرتویی محاسبه شده در این مطالعه در ادامه ارائه شده است. کاهش انرژی به دلیل برهمکنش پرتوهای گاما با ماده به صورت نمایی است. این کاهش مستقیماً با ضخامت ماده‌ای که پرتو از آن عبور می‌کند، مرتبط است. پارامترهای تئوری برای توضیح کارایی حفاظتی نمونه‌ها در برابر پرتوهای گاما عبارتند از: ضخامت نیم لایه (HVL)، ضخامت یک دهم لایه (TVL)، مسیر آزاد میانگین (MFP)، عدد اتمی مؤثر (Z_{eff})، چگالی الکترونی مؤثر (N_{eff}) و عدد اتمی معادل (Z_{eq}) که به ترتیب با معادلات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند.

$$(۱) HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$(۲) TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

$$(۳) MFP = \frac{1}{\mu}$$

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j f_j \left(\frac{A}{Z}\right)_j \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (۴)$$

$$N_{eff} = \frac{\mu_m}{\sigma_e} = \frac{N_A}{M} Z_{eff} \sum_i f_i n_i \quad (۵)$$

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 (\log \log R_2 - \log \log R_1) + Z_2 (\log \log R_3 - \log \log R_2)}{\log \log R_3 - \log \log R_1} \quad (۶)$$

در این روابط μ ضریب تضعیف خطی، σ_a و σ_e سطح مقطع اتمی و الکترونی، f_i و f_j کسر وزنی عناصر، A_i و A_j وزن اتمی، Z_i عدد اتمی، R نسبت ضریب تضعیف جرمی کامپتون به کل و Z_1 و Z_2 اعداد اتمی مرجع می‌باشند.

ضریب تضعیف جرمی برای ضخامت (x) ماده‌ای به جرم m با استفاده از قانون Beer-Lambert داده شده در معادله (۷) و معادله (۸) به دست می‌آید.



$$(۷) I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$(۸) \mu_m = \frac{\mu}{m}$$

سرعت از دست دادن انرژی ذرات باردار هنگام عبور از یک ماده، به عنوان توان توقف خطی ماده شناخته می‌شود که برای ذرات باردار، با کاهش سرعت ذره، افزایش می‌یابد. توان توقف خطی $(-dE/dx)$ ماده توسط معادله (۷) بدست می‌آید. در این معادله، توان توقف الکترونی ناشی از برهمکنش ذره باردار با الکترون‌های اتمی در ماده و توان توقف هسته‌ای ناشی از برهمکنش ذره باردار با هسته اتم است. علامت منفی نیز نشان‌دهنده این است که ذره باردار انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهد [۱۵].

$$-\frac{dE}{dx} = S_{\text{electronic}} + S_{\text{nuclear}} \quad (۹)$$

فاصله طی شده توسط ذرات باردار پیش از آنکه تمام انرژی خود را در برهمکنش‌هایشان با ماده از دست بدهند، به عنوان برد پیش‌بینی شده (PR) یا فاصله توقف ذره شناخته می‌شود و توسط معادله (۸) قابل محاسبه است که به نوع ماده، نوع ذره و انرژی بستگی دارد [۱۶].

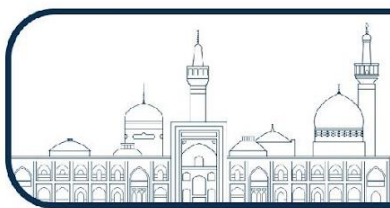
$$R = \int_0^E \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{electronic}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{nuclear}}} \quad (۱۰)$$

مقادیر MSP و PR برای ذرات ^1H و ^2He با استفاده از کد SRIM که یک برنامه نرم افزاری برای بررسی برهمکنش یونها با ماده می‌باشد، محاسبه شد [۱۷، ۱۸].

۳ - نتایج و بحث:

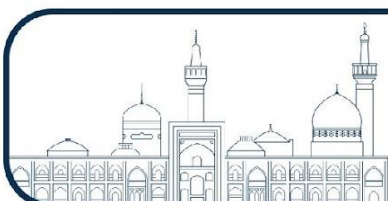
در این مطالعه، پارامترهای حفاظتی لنزهای عینک (CR-۳۹، پلی کربنات و تری وکس) در برابر پرتوهای گاما در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت محاسبه گردید. برخی از مقادیر ضریب تضعیف جرمی که با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP و نرم‌افزار WinXCOM به دست آمدند، در جدول ۲ همراه با اختلاف نسبی (RD) بین این مقادیر ارائه شده‌اند. مقادیر RD برای لنز CR-۳۹ بین ۰/۰۵۶۱ تا ۱/۲۱۹ درصد، برای پلی کربنات بین ۰/۱۵۸۴ تا ۲/۵۷۲ درصد و برای تری وکس بین ۰/۰۰۱ تا ۶/۴۷۹ درصد متغیر بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی بسیار نزدیک به نتایج محاسبات تئوری هستند. این موضوع نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تضعیف جرمی به دست آمده از MCNP و WinXCOM تطابق خوبی دارند.

شکل ۲ تغییرات ضریب تضعیف جرمی کل (μ_m) را برای لنزهای مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، مقادیر μ_m با افزایش انرژی تمایل به کاهش دارند. این رفتار به دلیل برهمکنش‌های مختلف فوتون‌ها با ماده است که شامل اثر فوتوالکتریک (PE)، پراکندگی کامپتون (CS) و تولید جفت (PP) می‌شود. در محدوده انرژی پایین (۰/۰۱ تا ۰/۰۵ مگاالکترون‌ولت)، اثر فوتوالکتریک غالب است و کاهش ناگهانی در μ_m مشاهده می‌شود.



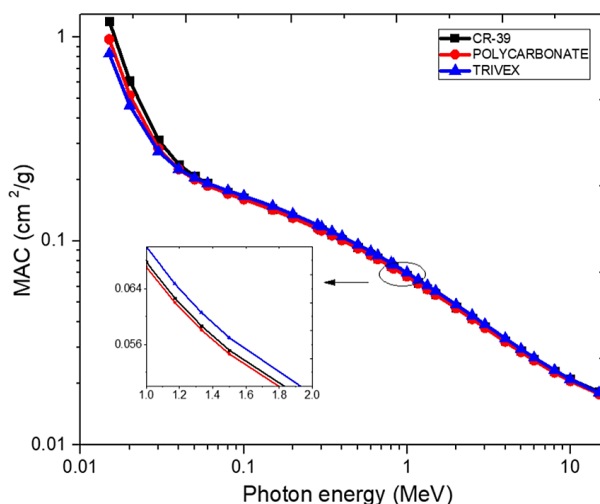
جدول ۲: مقایسه داده‌های MCNP و WinXCOM برای ضریب تضعیف جرمی لنزهای عینک در انرژی‌های مختلف پرتو گاما.

لنز مورد بررسی	انرژی (MeV)	ضریب تضعیف جرمی (cm^2g^{-1})	اختلاف نسبی (RD) (%)	لنز مورد بررسی	انرژی (MeV)	ضریب تضعیف جرمی (cm^2g^{-1})	اختلاف نسبی (RD) (%)
CR-39	۰,۳۵۶	MCNP: ۰,۱۰۵۶۵۵ WinXCOM: ۰,۱۰۵۴۳۰	۰,۲۱۳۴۱۲	پلی کربنات	۰,۳۵۶	MCNP: ۰,۱۰۶۶۰۵ WinXCOM: ۰,۱۰۶۵۲۸	۰,۰۷۲۲۸۱
	۰,۵۱۱	MCNP: ۰,۰۸۵۹۴۲ WinXCOM: ۰,۰۸۸۲۱۱	۲,۵۷۲۲۴۲		۰,۵۱۱	MCNP: ۰,۰۸۹۰۶۶ WinXCOM: ۰,۰۸۹۱۱۶	۰,۰۵۶۱۰۷
	۰,۶۶۲	MCNP: ۰,۰۸۱۲۶۲ WinXCOM: ۰,۰۸۱۳۹۱	۰,۱۵۸۴۹۴		۰,۶۶۲	MCNP: ۰,۰۸۲۴۱۱ WinXCOM: ۰,۰۸۲۲۲۲	۰,۲۲۹۸۶۵
	۱,۱۷۳	MCNP: ۰,۰۵۸۹۹۰ WinXCOM: ۰,۰۵۹۴۱۳	۰,۷۱۱۹۶۵		۱,۱۷۳	MCNP: ۰,۰۵۹۲۸۹ WinXCOM: ۰,۰۶۰۰۲۱	۱,۲۱۹۵۷۳
	۱,۲۷۵	MCNP: ۰,۰۵۷۱۲۰ WinXCOM: ۰,۰۵۸۱۳۶	۱,۷۴۷۶۲۶		۱,۲۷۵	MCNP: ۰,۰۵۸۸۶۵ WinXCOM: ۰,۰۵۸۷۳۰	۰,۲۲۹۸۶۵
	۱,۳۳	MCNP: ۰,۰۶۱۰۶۱ WinXCOM: ۰,۰۶۲۰۱۰	۱,۵۳۰۳۹۸		۱,۳۳	MCNP: ۰,۰۶۲۶۸۵ WinXCOM: ۰,۰۶۲۶۳۹	۰,۰۷۳۴۳۷
تری وکس	۰,۳۵۶	MCNP: ۰,۱۰۷۷۶۴ WinXCOM: ۰,۱۰۹۹۴۷	۱,۴۴۷۴۹۸	تری وکس	۱,۱۷۳	MCNP: ۰,۰۶۱۰۷۲ WinXCOM: ۰,۰۶۱۹۶۹	۱,۹۸۵۵۰۲



۰,۰۸۰۸۱۱	MCNP: ۰,۰۶۰۶۸۴ WinXCOM: ۰,۰۶۰۶۳۵	۱,۲۷۵		۰,۰۰۱۰۸۷	MCNP: ۰,۰۹۲۰۰۰ WinXCOM: ۰,۰۹۱۹۹۹	۰,۵۱۱	
۶,۴۷۹,۰۹۱	MCNP: ۰,۰۶۸۸۷۶ WinXCOM: ۰,۰۶۴۶۸۵	۱,۳۳		۰,۱۷۳۱۵۳	MCNP: ۰,۰۸۵۰۴۳ WinXCOM: ۰,۰۸۴۸۹۶	۰,۶۶۲	

در این محدوده، لنز CR-39 بیشترین مقادیر μ_m را داشت. در محدوده انرژی متوسط (۰/۱ تا ۱۰ مگا الکترون ولت)، پراکندگی کامپتون غالب است و تغییرات μ_m کندتر است. در این محدوده، لنز تری وکس بیشترین مقادیر μ_m را نشان داد. در محدوده انرژی بالا (بالتر از ۱۰ مگا الکترون ولت)، تولید جفت غالب است و μ_m به طور ملایم افزایش می‌یابد. در این محدوده، لنز CR-39 دوباره بیشترین مقادیر μ_m را داشت.



شکل (۲) ضریب تضعیف جرمی برای لنزهای CR-39، پلی کربنات و تری وکس.

مقادیر ضخامت نیم لایه (HVL)، ضخامت یک دهم لایه (TVL) و مسیر آزاد میانگین (MFP) اطلاعات مهمی در مورد پارامترهای برهمکنش فوتون ارائه می‌دهند. تغییرات این پارامترها برای نمونه‌های مورد بررسی در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌است. شکل ۳ تغییرات HVL را برای لنزهای CR-39، پلی کربنات و تری وکس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی انرژی‌ها، لنز CR-39 به کم‌ترین ضخامت برای کاهش شدت پرتو نیاز دارد. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش انرژی، ضخامت مورد نیاز ماده برای کاهش شدت پرتو افزایش می‌یابد.

شکل ۴ تغییرات TVL را بر اساس انرژی فوتون نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لنز CR-39 کم‌ترین مقادیر TVL را دارد، در حالی که لنز تری وکس بیشترین مقادیر TVL را نشان می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کنند که با افزایش انرژی، ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو به یک‌دهم افزایش می‌یابد.

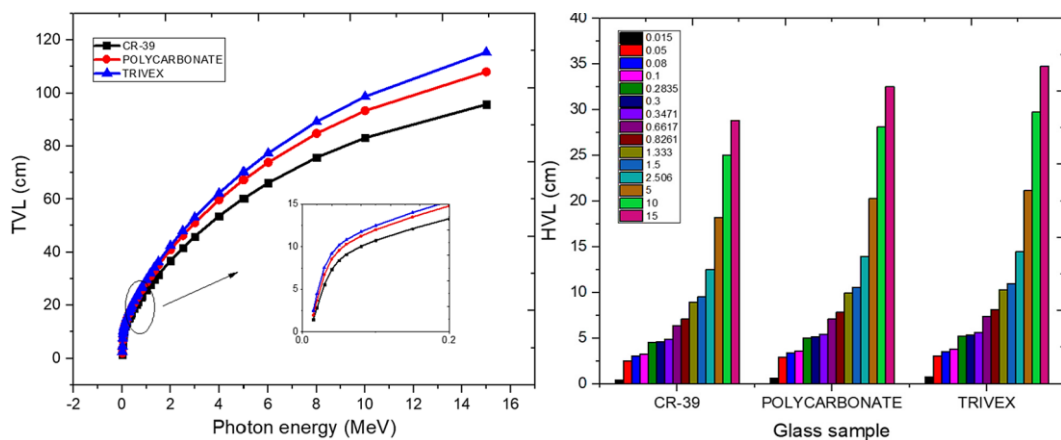


شکل ۵ تغییرات MFP را بر اساس چگالی نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی، مقادیر MFP کاهش می‌یابد و با افزایش انرژی، MFP افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که مواد با چگالی بالاتر، فاصله حرکت فوتون بین برهمکنش‌های متوالی را کاهش می‌دهند.

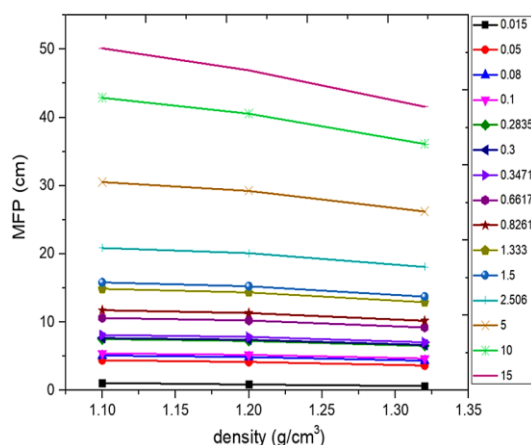
علاوه بر پارامترهای فوتونی، ویژگی‌های حفاظتی لنزهای عینک در برابر ذرات باردار (پروتون و آلفا) نیز بررسی شد. شکل ۶ تغییرات توان توقف جرمی (MSP) را برای پروتون و آلفا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، MSP ابتدا با افزایش انرژی به حداکثر می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. در تمامی انرژی‌ها، لنز تری‌وکس بیشترین مقادیر MSP را داشت.

شکل ۷ تغییرات برد پیش‌بینی شده (PR) را برای پروتون و آلفا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لنز CR-۳۹ کم‌ترین مقادیر PR را در تمامی انرژی‌ها داشت. این نتایج نشان می‌دهند که لنز CR-۳۹ بهترین عملکرد حفاظتی را در برابر ذرات باردار دارد.

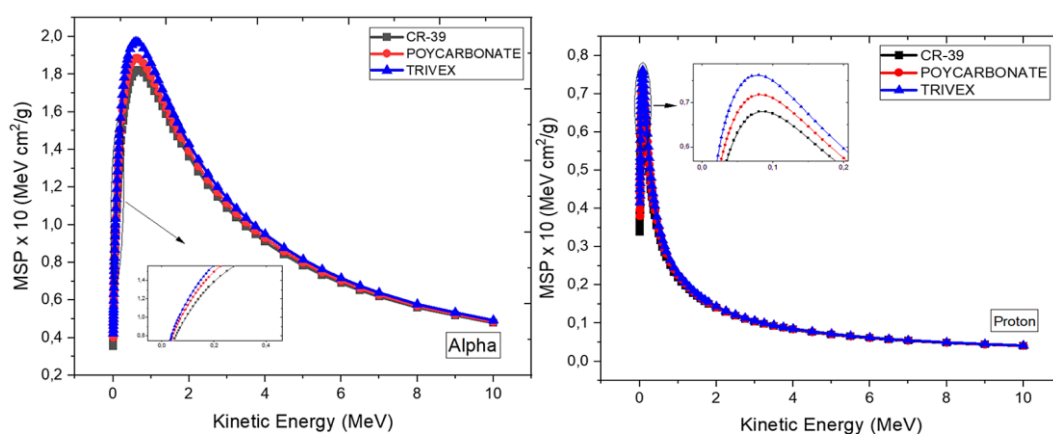
در نهایت، نتایج این مطالعه نشان داد که لنز CR-۳۹ بهترین عملکرد حفاظتی را در برابر پرتوهای فوتونی و ذرات باردار دارد. این لنز کم‌ترین مقادیر MFP، TVL، HVL و PR را در تمامی انرژی‌ها نشان داد و بیشترین توانایی را در جذب و کاهش پرتوهای یونیزه‌کننده داشت. این یافته‌ها اهمیت انتخاب مواد مناسب برای لنزهای عینک با توجه به ویژگی‌های حفاظتی آن‌ها را برجسته می‌کند.



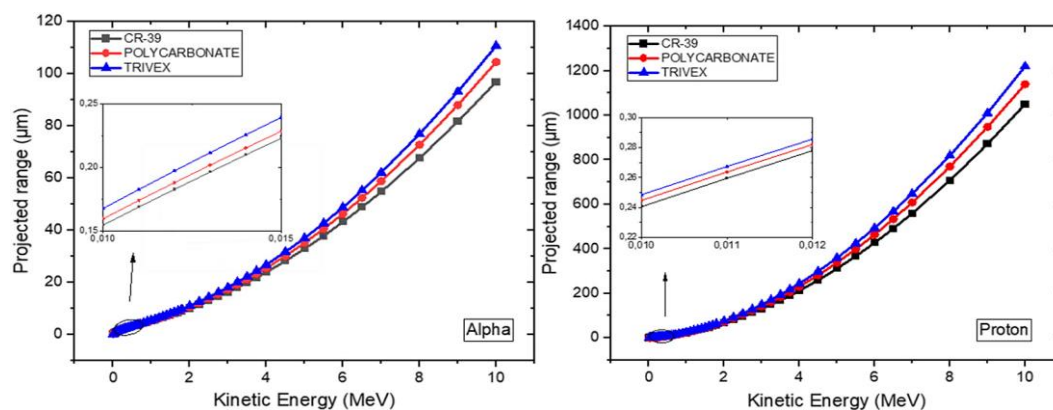
شکل (۳) ضخامت نیم لایه (HVL) برای لنزهای CR- (۴) ضخامت یک دهم لایه (TVL) برای لنزهای CR-۳۹، پلی‌کربنات و تری‌وکس.



شکل (۵) مسیر آزاد میانگین (MFP) برای لنزهای CR-۳۹، پلی کربنات و تری وکس.



شکل (۶) تغییرات توان توقف جرمی (MSP) برای پروتون و آلفا در لنزهای CR-۳۹، پلی کربنات و تری وکس.



شکل (۷) تغییرات برد پیش‌بینی شده (PR) برای پروتون و آلفا در لنزهای CR-۳۹، پلی کربنات و تری وکس.



۴ - نتیجه گیری:

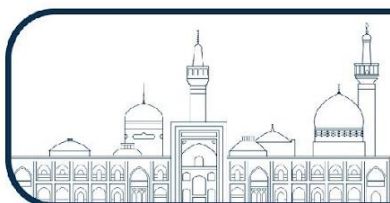
در این مطالعه، ویژگی‌های حفاظتی لنزهای عینک (CR-۳۹، پلی کربنات و تری وکس) در برابر پرتوهای فوتونی و ذرات باردار (پروتون و آلفا) به طور جامع بررسی شد. نتایج نشان داد که لنز CR-۳۹ بهترین عملکرد حفاظتی را در برابر پرتوهای یونیزه کننده دارد. این لنز در محدوده‌های انرژی پایین و بالا بیشترین مقادیر ضریب تضعیف جرمی (MAC) را نشان داد، در حالی که لنز تری وکس در محدوده انرژی متوسط (۱ تا ۱۰ مگا الکترون ولت) عملکرد بهتری داشت. این موضوع نشان می‌دهد که CR-۳۹ در جذب پرتوهای کم انرژی و پرانرژی برتری دارد.

علاوه بر این، لنز CR-۳۹ کمترین مقادیر ضخامت نیم لایه (HVL)، ضخامت یک دهم لایه (TVL) و مسیر آزاد میانگین (MFP) را در تمامی انرژی‌ها داشت. این نتایج تأیید می‌کنند که CR-۳۹ برای کاهش شدت پرتو به ضخامت کمتری نسبت به پلی کربنات و تری وکس نیاز دارد و بنابراین، کارایی حفاظتی بهتری در برابر پرتوهای فوتونی ارائه می‌دهد.

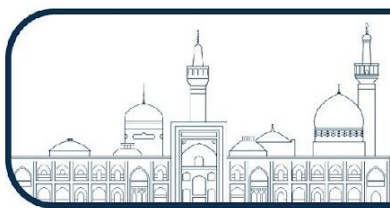
در مورد ذرات باردار (پروتون و آلفا)، لنز تری وکس بیشترین مقادیر توان توقف جرمی (MSP) را در تمامی انرژی‌ها داشت. با این حال، لنز CR-۳۹ کمترین مقادیر برد پیش‌بینی شده (PR) را نشان داد، که نشان‌دهنده بهترین عملکرد حفاظتی در برابر ذرات باردار است. این نتایج تأیید می‌کنند که CR-۳۹ بهترین گزینه برای حفاظت از چشم در برابر پرتوهای یونیزه کننده است. در نهایت، این مطالعه نشان داد که ساختار و ترکیب مواد لنزهای عینک تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های حفاظتی آن‌ها در برابر پرتوها دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی لنزهای عینک با ویژگی‌های حفاظتی بهتر کمک کند و زمینه را برای تحقیقات بیشتر در این حوزه فراهم آورد.

۵ - مراجع:

- [۱] WHO, World report on vision. World health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/328717>. Accessed ۱۲ Jan ۲۰۲۱ (۲۰۱۹).
- [۲] Alonso, J., Gómez-Pedrero, J.A. and Quiroga, J.A., ۲۰۱۹. Modern ophthalmic optics. Cambridge University Press.
- [۳] Musikant, S., ۲۰۲۰. Optical materials: an introduction to selection and application. CRC Press.
- [۴] Şen, F. and Göker, B., ۲۰۱۴. A theoretical investigation b monomer that is a plastic pol manufacture of eyeglass lens. American Journal of Optics and Photon, ۲(۱), pp.۷-۱۱.
- [۵] Miller, J.W., Kislin, B., Tredici, T.J. and Rahe, A.J., ۱۹۷۹. Polycarbonate versus CR-۳۹ lenses: A field study. USAF School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base, Texas.
- [۶] Chou, B.R., Dain, S.J. and Cheng, B.B., ۲۰۱۵. Effect of ultraviolet exposure on impact resistance of ophthalmic lenses. Optometry and Vision Science, ۹۲(۱۲), pp.۱۱۵۴-۱۱۶۰.
- [۷] Barnard, S.G., Ainsbury, E.A., Quinlan, R.A. and Bouffler, S.D., ۲۰۱۶. Radiation protection of the eye lens in medical workers—basis and impact of the ICRP recommendations. The British journal of radiology, ۸۹(۱۰۶۰), p.۲۰۱۵۱۰۳۴.



- [۸] STRALINGS DOSIMETRIE, N.C.V., ۲۰۱۸. Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens.
- [۹] Şakar, E., Özpolat, Ö.F., Alım, B., Sayyed, M.I. and Kurudirek, M., ۲۰۲۰. Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. Radiation Physics and Chemistry, ۱۶۶, p.۱۰۸۴۹۶.
- [۱۰] Chantarachindawong, R., Osotchan, T., Chindaudom, P. and Srihirin, T., ۲۰۱۶. Hard coatings for CR-۳۹ based on Al ۲ O ۳-ZrO ۲ ۳-glycidoxypolytrimethoxysilane (GPTMS) and tetraethoxysilane (TEOS) nanocomposites. Journal of Sol-Gel Science and Technology, ۷۹, pp.۱۹۰-۲۰۰.
- [۱۱] Pillay, R., Hansraj, R. and Rampersad, N., ۲۰۲۰. Historical development, applications and advances in materials used in spectacle lenses and contact lenses. Clinical Optometry, pp.۱۵۷-۱۶۷.
- [۱۲] Chou, B.R. and Hovis, J.K., ۲۰۰۶. Effect of multiple antireflection coatings on impact resistance of Hoya Phoenix spectacle lenses. Clinical and Experimental Optometry, ۸۹(۲), pp.۸۶-۸۹.
- [۱۳] Reyes Domínguez, J.F., ۲۰۱۳. Resistencia a los impactos: una mirada óptica. Ciencia y Tecnología para la salud visual y ocular, ۱۱(۲), pp.۱۱۳-۱۲۵.
- [۱۴] Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. and Leving, H., ۲۰۰۴. WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. Radiation physics and chemistry, ۷۱(۳-۴), pp.۶۵۳-۶۵۴.
- [۱۵] Knoll, G.F., ۲۰۱۰. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.
- [۱۶] Bramha, S. and Chandrasekaran, S., ۲۰۲۴. Evaluation and assessments of efficiency calibration and resolution of an alpha spectrometry system using standard sources. Radiation Protection and Environment, ۴۷(۳), pp.۲۰۵-۲۱۰.
- [۱۷] Kamislioglu, M., ۲۰۲۱. An investigation into gamma radiation shielding parameters of the (Al: Si) and (Al+ Na): Si-doped international simple glasses (ISG) used in nuclear waste management, deploying Phy-X/PSD and SRIM software. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, ۳۲, pp.۱۲۶۹۰-۱۲۷۰۴.
- [۱۸] Kamislioglu, M., ۲۰۲۱. Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters. Results in Physics, ۲۲, p.۱۰۳۸۴۴.



توسعه یک پایگاه داده طیف های گاما نمونه های محیطی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

گیت (کد مقاله : ۱۲۲۳)

راکب، زهرا ۱- صفری، رسول ۱- پریشان، محمدرضا ۱- خلف خان، مهدی ۲- سینا، صدیقه ۲*

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

۲- دانشگاه شیراز، مرکز تحقیقات تابش

چکیده:

پایش محیطی و اندازه گیری اکتیویته نمونه های محیطی مانند آب، خاک و هوا برای حفظ سلامت انسان و محیط زیست ضروری است. با افزایش فعالیت های صنعتی و استفاده از انرژی هسته ای، خطر انتشار مواد رادیواکتیو در محیط بیشتر شده است. آشکارسازهای ژرمانیوم فوق خالص به دلیل دقت بالا در شناسایی ایزوتوپ های رادیواکتیو، ابزاری کلیدی در پایش محیطی محسوب می شوند. هوش مصنوعی نیز با بهبود سرعت و دقت تحلیل داده های طیف نگاری گاما، تحول بزرگی در این حوزه ایجاد کرده است. با این حال، کمبود داده های واقعی به دلیل پیچیدگی و زمان بر بودن اندازه گیری ها، چالشی جدی است. در این پژوهش، از شبیه سازی مونت کارلو با نرم افزار Gate برای تولید داده های مصنوعی طیف های گاما استفاده شد. یک آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا و نمونه های محیطی خاک شبیه سازی شدند. نتایج نشان داد که طیف های تولید شده با طیف های واقعی تطابق خوبی دارند. این پایگاه داده می تواند کمبود داده های واقعی را جبران کرده و به بهبود دقت تحلیل های هوش مصنوعی کمک کند. ترکیب شبیه سازی های پیشرفته و هوش مصنوعی، گامی مؤثر در جهت ارتقای پایش محیطی و کنترل آلودگی های رادیواکتیو است.

کلمات کلیدی: پایگاه داده، شبیه سازی، طیف نگاری گاما، نمونه محیطی، گیت

Development of a Gamma-Spectrum Database for Environmental Samples by Using Monte-Carlo Gate Simulation

Rakeb, Zahra ۱- Safari, Rasool ۱- Parishan, MohammadReza ۱- Khalafkhan, Mehdi ۲- Sina, Sedigheh ۱,۲*

۱-Shiraz University, Mechanical engineering faculty, Nuclear engineering department

۲-Shiraz University, Radiation Research Center

Abstract:

Environmental monitoring and measuring the activity of environmental samples such as water, soil, and air are essential for preserving human health and the environment. With the increase in industrial activities and the use of nuclear energy, the risk of radioactive material release into the environment has grown. High-purity germanium detectors, due to their high accuracy in identifying radioactive isotopes, are considered key tools in environmental monitoring. Artificial intelligence has also brought about a significant transformation in this field by improving the speed and accuracy of gamma spectroscopy data analysis. However, the lack of real data due to the complexity and time-consuming nature of measurements poses a serious challenge. In this study, Monte Carlo simulation using the Gate software was employed to generate synthetic gamma spectrum data. A high-purity germanium detector and



environmental soil samples were simulated. The results showed that the generated spectra closely matched real spectra. This database can compensate for the lack of real data and enhance the accuracy of artificial intelligence analyses. The combination of advanced simulations and artificial intelligence represents an effective step toward improving environmental monitoring and controlling radioactive pollution.

Key words: Database, Simulation, Gamma Spectroscopy, Environmental Sample, Gate

۱- مقدمه:

پایش محیطی و تعیین اکتیویته نمونه‌های محیطی از جمله اقدامات ضروری برای حفظ سلامت انسان و محیط زیست محسوب می‌شوند. با افزایش فعالیت‌های صنعتی، استفاده از انرژی هسته‌ای و وجود منابع طبیعی رادیواکتیو، احتمال انتشار مواد رادیواکتیو در محیط زیست افزایش یافته است. این مواد می‌توانند اثرات مخربی بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان داشته باشند. از این رو، پایش مستمر محیطی و اندازه‌گیری اکتیویته نمونه‌هایی مانند آب، خاک، هوا و مواد غذایی، به شناسایی و کنترل منابع آلودگی رادیواکتیو کمک می‌کند. این اطلاعات نه تنها برای ارزیابی خطرات و تعیین استانداردهای ایمنی ضروری است، بلکه در مدیریت بحران‌های احتمالی و برنامه‌ریزی‌های کلان محیطی نیز نقش حیاتی ایفا می‌کند [۱]، [۲].

استفاده از آشکارسازهای ژرمانیوم فوق خالص^{۶۵} به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای پایش محیطی و تعیین اکتیویته نمونه‌های محیطی شناخته می‌شود. این آشکارسازها به دلیل وضوح انرژی بالا قادرند طیف‌های گامای نمونه‌ها را با دقت بسیار بالایی ثبت کنند، که این امر امکان شناسایی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو مختلف حتی در غلظت‌های بسیار کم را فراهم می‌سازد. این آشکارساز به‌طور گسترده‌ای در تحلیل نمونه‌های محیطی مانند آب، خاک، هوا و مواد غذایی استفاده می‌شود، زیرا توانایی تشخیص طیف‌های پیچیده و تفکیک پیک‌های انرژی نزدیک به هم را دارد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که به ابزاری ضروری در مطالعات رادیولوژی محیطی، ارزیابی آلودگی‌های رادیواکتیو و نظارت بر ایمنی محیط زیست تبدیل شود [۳]، [۴]. استفاده از هوش مصنوعی در طیف‌نگاری گاما به‌عنوان یک تحول بزرگ در تحلیل داده‌های رادیواکتیو و پایش محیطی شناخته می‌شود. با توجه به حجم زیاد و پیچیدگی داده‌های طیف‌های گاما، روش‌های سنتی تحلیل داده‌ها اغلب زمان‌بر و مستعد خطاهای انسانی هستند. هوش مصنوعی، به‌ویژه تکنیک‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، می‌تواند این چالش‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. این امر نه تنها سرعت تحلیل داده‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه دقت و قابلیت اطمینان نتایج را نیز بهبود می‌بخشد [۵]، [۶]، [۷].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در طیف‌نگاری گاما، شناسایی و تفکیک پیک‌های هم‌پوشان است. علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند در کالیبراسیون خودکار دستگاه‌های طیف‌سنجی و حتی پیش‌بینی میزان آلودگی رادیواکتیو در محیط‌های مختلف استفاده شود [۸].

با توجه به افزایش روزافزون نیاز به پایش محیطی و کنترل آلودگی‌های رادیواکتیو، استفاده از هوش مصنوعی در طیف‌نگاری گاما نه تنها به بهبود کیفیت تحلیل‌ها کمک می‌کند، بلکه هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای این فرآیندها را نیز کاهش می‌دهد. این فناوری به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، نقش کلیدی در ارتقای ایمنی محیط زیست و سلامت انسان ایفا می‌کند.

اهمیت تعداد داده‌های آموزشی در دقت شبکه‌های عصبی را نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا حجم و کیفیت داده‌های آموزشی به‌طور مستقیم بر عملکرد و قابلیت تعمیم مدل تأثیر می‌گذارد. شبکه‌های عصبی، به‌ویژه مدل‌های یادگیری عمیق، برای یادگیری الگوهای پیچیده و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق، به حجم زیادی از داده‌های متنوع و باکیفیت نیاز دارند. هرچه تعداد داده‌های



آموزشی بیشتر باشد، شبکه عصبی بهتر می‌تواند ویژگی‌های مرتبط با مسئله را شناسایی کرده و از بیش‌برازش^{۶۶} جلوگیری کند [۹]، [۱۰]

در حوزه‌هایی مانند طیف‌نگاری گاما، که داده‌ها اغلب پیچیده و دارای نویز هستند، وجود یک مجموعه داده بزرگ و جامع به شبکه عصبی کمک می‌کند تا نتایج دقیق‌تری ارائه دهد. علاوه بر این، داده‌های آموزشی متنوع می‌توانند به مدل کمک کنند تا شرایط مختلف را درک کرده و در موقعیت‌های واقعی عملکرد بهتری داشته باشد. در نهایت، افزایش تعداد داده‌های آموزشی نه تنها دقت مدل را بهبود می‌بخشد، بلکه اعتمادپذیری و قابلیت اطمینان آن را نیز افزایش می‌دهد.

یکی از چالش‌های اصلی در حوزه طیف‌نگاری گامای نمونه‌های محیطی، کمبود داده‌های واقعی است. این مشکل به دلایل متعددی از جمله اکتیویته کم نمونه‌های محیطی، زمان طولانی مورد نیاز برای اندازه‌گیری‌های دقیق، و تنوع بالای نمونه‌ها ایجاد می‌شود. نمونه‌های محیطی مانند آب، خاک و هوا اغلب دارای سطوح پایینی از مواد رادیواکتیو هستند که این امر باعث می‌شود اندازه‌گیری‌های دقیق به زمان زیادی نیاز داشته باشند. علاوه بر این، تنوع زیاد نمونه‌ها از نظر ترکیب شیمیایی و فیزیکی، شرایط اندازه‌گیری را پیچیده‌تر می‌کند و نیاز به کالیبراسیون‌های متعدد و روش‌های تحلیل متفاوت دارد.

این محدودیت‌ها باعث می‌شود جمع‌آوری داده‌های واقعی به اندازه کافی برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی دشوار باشد. در نتیجه، پژوهشگران اغلب به روش‌های جایگزین مانند شبیه‌سازی‌های کامپیوتری روی می‌آورند. این روش‌ها می‌توانند تا حدی کمبود داده‌های واقعی را جبران کنند.

پژوهشگران متعددی در زمینه تهیه داده‌های طیف‌نگاری گاما مطالعاتی انجام داده‌اند، چویی^{۶۷} و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی MCNP داده‌های تعدادی از چشمه‌های رادیواکتیو را جمع‌آوری کردند که در این پژوهش تنها اثر بک‌گراند در نظر گرفته شده بود [۱۱]. Kwon و همکاران در سال ۲۰۲۳ از Geant^۴ برای شبیه‌سازی طیف‌های گاما استفاده کردند که تمرکز آن‌ها بر چشمه‌های رادیواکتیو مصنوعی بوده است [۱۲]. در حال حاضر پایگاه داده‌هایی در زمینه طیف‌های گاما وجود دارد که طیف‌های چشمه‌های مختلف رادیواکتیو و آشکارسازهای مختلفی را در برمی‌گیرند [۱۳]، [۱۴]، [۱۵] اما با توجه به اهمیت طیف‌های محیطی و کاربرد گسترده آشکارساز ژرمانیوم خلوص بالا در طیف‌نگاری این نمونه‌ها خلا وجود یک پایگاه داده طیف‌های محیطی و توجه به تمام پارامترهای یک سیستم آشکارسازی به منظور شباهت هرچه بیشتر به نمونه‌های واقعی، احساس می‌شود.

هدف از انجام این پژوهش توسعه یک پایگاه داده طیف‌های گاما نمونه‌های محیطی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو گیت بوده است.

۲- روش کار:

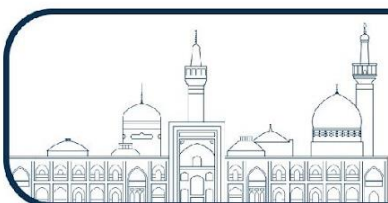
شبیه‌ساز گیت^{۶۸} بر اساس جینت^{۶۹} یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی برهم‌کنش ذرات با ماده است که به‌طور گسترده در فیزیک هسته‌ای، پزشکی و محیطی استفاده می‌شود. این شبیه‌ساز قادر است رفتار ذرات مانند فوتون‌های گاما را در مواد مختلف با دقت بالا مدل‌سازی کند. از مزایای آن می‌توان به انعطاف‌پذیری بالا، پشتیبانی از طیف وسیعی از فیزیک ذرات، و امکان شبیه‌سازی شرایط پیچیده اشاره کرد. این ابزار برای تولید داده‌های آموزشی مصنوعی در تحلیل طیف‌های گاما و کاهش نیاز به داده‌های واقعی بسیار مفید است [۱۶].

^{۶۶} overfitting

^{۶۷} Choi

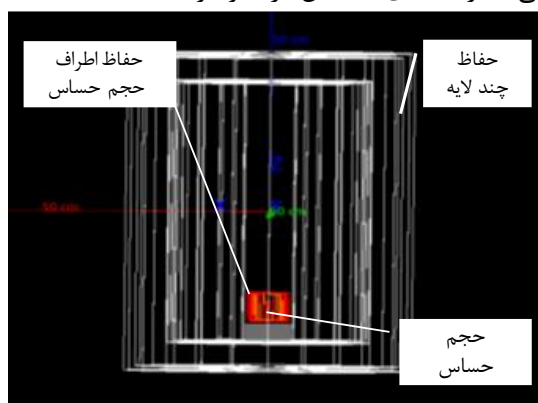
^{۶۸} GATE

^{۶۹} Geant^۴



۲-۱- شبیه سازی

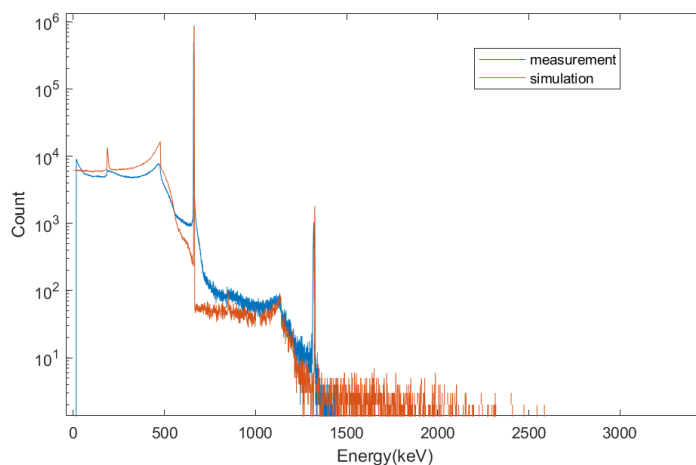
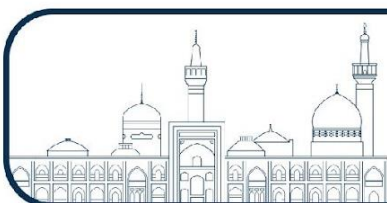
در شبیه سازی انجام شده، با استفاده از کد گیت نسخه ۹.۰.۱، یک آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا نوع p به همراه حفاظ های قرار گرفته پیرامون آن، شبیه سازی شد. این شبیه سازی به صورت مدل سازی اجزا مختلف یک آشکارساز واقعی، با استفاده از اشکال هندسی تعریف شده در گیت انجام گرفت. در شکل ۱ هندسه این آشکارساز شبیه ساز شده قابل مشاهده است. برای این سیستم آشکارسازی پارامترهایی از جمله زمان مرگ و رزولوشن مطابق با مشخصات دستگاه طیف نگار ژرمانیوم با خلوص بالا مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز تعریف شده است. در قسمت بالایی آشکارساز ظروف استاندارد حاوی نمونه های محیطی مورد طیف نگاری ترسیم شده است که به عنوان هندسه چشمه در نظر گرفته می شود. جنس محتویات این ظرف که به عنوان چشمه استفاده می شود، خاک معمولی با درصد های مشخص در نظر گرفته شده است [۱۷].



شکل ۱. هندسه یک آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا نوع p به همراه حفاظ های اطراف آن در محیط شبیه سازی گیت در تعریف چشمه به صورت تصادفی یک یا چند نمونه از زنجیره های ^{232}Th ، ^{238}U ، ^{235}U و رادیوایزوتوپ منفرد ^{40}K و با بازه فعالیت معمول در طبیعت استفاده شده است [۱۸]. چشمه به صورت انرژی و فراوانی هر انرژی شبیه سازی شده که فراوانی هر یک از رادیوایزوتوپ های ذکر شده و دخترانشان مطابق با جداول داده های هسته ای تعیین شده است. همچنین در این شبیه سازی فیزیک لیست "emstandard" برای شبیه سازی برهمکنش های ممکن مورد استفاده قرار گرفت.

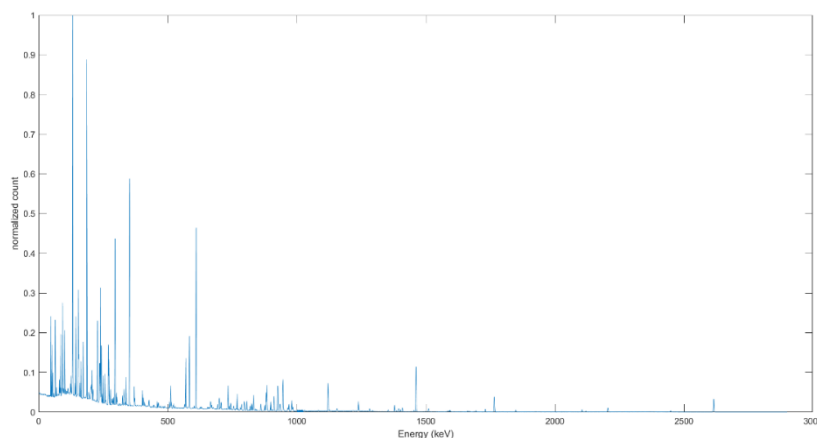
۳- نتایج:

ساختار خروجی شبیه سازی به صورت لیستی از انرژی های به جا گذاشته شده توسط هر فوتون در حجم حساس آشکار ساز است. طیف های خروجی یک نمونه شبیه سازی چشمه های سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰ با طیف های واقعی مقایسه شده و تطابق خوبی در FWHM پیک ها مشاهده شد. مقایسه طیف سزیم-۱۳۷ اندازه گیری شده با طیف نگار ژرمانیوم با خلوص بالا و طیف شبیه سازی شده با مشخصات مشابه در شکل ۲ قابل مشاهده است. در این مقایسه یکی از پارامترهای مورد بررسی، رزولوشن طیف تمام انرژی در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت بوده است؛ که مقایسه میزان خطای نسبی ۱.۲۶٪ شبیه سازی نسبت به واقعیت را نشان می دهد. پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است نسبت شدت پیک تمام انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت به شدت پیک همزمانی تصادفی ۷۰٪ با انرژی ۱۳۲۳ بوده است. اختلاف این نسبت ها نیز خطای نسبی ۰.۴۲٪ شبیه سازی نسبت به واقعیت را نشان میدهد.



شکل ۲. مقایسه طیف سزیم-۱۳۷ بدست آمده با اندازه گیری با استفاده از آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا (شکل بالا) و طیف بدست آمده با شبیه سازی با مشخصات سیستم آشکار سازی مشابه (شکل پایین)

پس از رسم طیف های نمونه های محیطی بر اساس داده های خروجی، با استفاده از چشمه های تعریف شده، لیبل های مورد نیاز برای استفاده در راستای تشخیص پیک ها با شبکه های عصبی استخراج می شوند. یک نمونه از طیف خروجی شبیه سازی در شکل ۳ قابل مشاهده است.



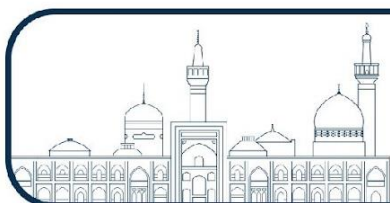
شکل ۳. یک نمونه از طیف های نمونه محیطی بدست آمده با شبیه سازی مونت کارلو گیت

تعداد بیش از پنج هزار فایل خروجی طیف شبیه سازی نمونه محیطی به همراه فایل لیبل و فایل اطلاعات چشمه جمع اوری شد که تعداد ۳۰۰۰ داده، لیبل و اطلاعات چشمه شبیه سازی شده در پلتفرم گیت هاب^{۷۱} قابل دسترسی است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

این پژوهش با هدف توسعه یک پایگاه داده طیف های گاما برای نمونه های محیطی، از شبیه سازی مونت کارلو ${}^{۹۰}\text{Sr}$ Gate استفاده کرد. شبیه سازی یک آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا به همراه نمونه های محیطی مانند خاک، با در نظر گرفتن پارامترهای واقعی انجام شد. نتایج نشان داد که طیف های تولید شده از شبیه سازی با طیف های واقعی تطابق خوبی دارند و

^{۷۱} <https://github.com/Z-Rakeb/NORM-gamma-spectrum-database.git>



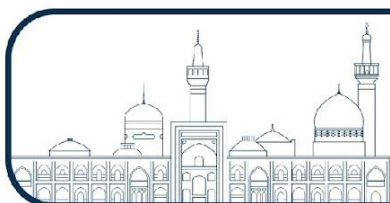
می‌توانند به‌عنوان داده‌های آموزشی برای مدل‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گیرند. این پایگاه داده می‌تواند کمبود داده‌های واقعی را جبران کرده و به بهبود دقت و قابلیت اطمینان تحلیل‌های طیف‌نگاری گاما کمک کند. استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های طیف‌های گاما، به‌ویژه در شناسایی پیک‌های هم‌پوشان و پیش‌بینی آلودگی رادیواکتیو، نقش مهمی در ارتقای ایمنی محیط زیست و سلامت انسان دارد. با توجه به پیچیدگی و تنوع نمونه‌های محیطی، توسعه چنین پایگاه‌های داده‌ای گامی مهم در جهت تسهیل تحقیقات آینده و بهبود روش‌های پایش محیطی است. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب شبیه‌سازی‌های پیشرفته و فناوری‌های هوش مصنوعی می‌تواند چالش‌های موجود در حوزه پایش رادیواکتیو را به‌طور مؤثر کاهش دهد.

۵- مراجع:

- [۱] IAEA, "Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection," Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection, ۲۰۰۵.
- [۲] C. M. Vandecasteele, "Environmental monitoring and radioecology: A necessary synergy," in Journal of Environmental Radioactivity, ۲۰۰۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۲۶۵-۹۳۱X(۰۳)۰۰۱۸۱-۴.
- [۳] G. Eleftheriou, C. Tsabaris, E. G. Androulakaki, F. K. Pappa, and D. L. Patiris, "High resolution gamma-ray spectrometry for routine measurements of environmental samples," Applied Radiation and Isotopes, vol. ۲۰۶, ۲۰۲۴, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.apradiso.۲۰۲۴.۱۱۱۲۳۴.
- [۴] M. U. Khandaker, P. J. Jojo, and H. A. Kassim, "Determination of Primordial Radionuclides in Natural Samples Using HPGe Gamma-Ray Spectrometry," APCBEE Procedia, vol. ۱, ۲۰۱۲, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.apcbee.۲۰۱۲.۰۳.۰۳۰.
- [۵] P. E. Keller and R. T. Kouzes, "Gamma spectral analysis via neural networks," in IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, ۱۹۹۵. doi: ۱۰.۱۱۰۹/nssmic.۱۹۹۴.۴۷۴۳۶۵.
- [۶] M. Zehtabvar, K. Taghandiki, N. Madani, D. Sardari, and B. Bashiri, "A Review on the Application of Machine Learning in Gamma Spectroscopy: Challenges and Opportunities," Spectroscopy Journal, vol. ۲, no. ۳, pp. ۱۲۳-۱۴۴, Jul. ۲۰۲۴, doi: ۱۰.۳۳۹۰/spectroscj۲۰۳۰۰۸.
- [۷] R. Zhao and N. Liu, "Deep Learning Model Based Gamma Spectrum Analysis Method," Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology, vol. ۵۷, no. ۲, pp. ۳۷۹-۳۸۸, Feb. ۲۰۲۳, doi: ۱۰.۷۵۳۸/yzk.۲۰۲۲.youxian.۰۲۱۵.
- [۸] X. Lu et al., "Segmentation-enhanced gamma spectrum denoising based on deep learning," IET Communications, vol. ۱۸, no. ۱, pp. ۶۳-۸۰, Jan. ۲۰۲۴, doi: ۱۰.۱۰۴۹/cmu۲,۱۲۷۰۶.
- [۹] E. By, Q. Zhang, and S. J. Stanley, "How Training Data Affect The Accuracy And Robustness Of Neural Networks For Image Classification," ۲۰۱۹.
- [۱۰] T. Kavzoglu, "Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data," Environmental Modelling and Software, vol. ۲۴, no. ۷, ۲۰۰۹, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.envsoft.۲۰۰۸.۱۱.۰۱۲.



- [۱۱] Y. Choi, Y. Y. Ji, and S. Joung, "Database of virtual spectrum of artificial radionuclides for education and training in in-situ gamma spectrometry," Nuclear Engineering and Technology, vol. ۵۵, no. ۱, pp. ۱۹۰-۲۰۰, Jan. ۲۰۲۳, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.net.۲۰۲۲.۰۷.۰۲۸.
- [۱۲] J. Kwon et al., "Development of gamma-spectrum data generation method by Monte Carlo simulation," Journal of the Korean Physical Society, vol. ۸۲, no. ۷, pp. ۶۵۸-۶۷۰, Apr. ۲۰۲۳, doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۴۰۰۴۲-۰۲۳-۰۰۷۶۰-۷.
- [۱۳] "Welcome! - Gamma Spectrum DB." Accessed: Jan. ۲۴, ۲۰۲۵. [Online]. Available: <https://gammadb.nuclearphoenix.xyz/>
- [۱۴] "Gamma Spectrum Database | Gammaspectacular." Accessed: Jan. ۲۴, ۲۰۲۵. [Online]. Available: <https://www.gammaspectacular.com/blue/gamma-spectra?srsId=AfmBOoqjja°AhcCe°yJLgUbs°ehsy°Hp°Il°Brjf°cWLYtNN°nmBNBoK>
- [۱۵] "IDB: Data Submission." Accessed: Jan. ۲۴, ۲۰۲۵. [Online]. Available: <https://nds.iaea.org/idb/data-submission>
- [۱۶] I. C.-I. P. Buvat and S. J. C.-S. Orsay, "Gate Manuals & Tutorials," Structure, vol. ۲۰۱۲, no. February, ۲۰۱۰.
- [۱۷] "Data Mining Analysis and Modeling Cell Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling," ۲۰۲۱. [Online]. Available: <https://www.ntis.gov/about>
- [۱۸] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. ۲۰۲۰.



بررسی خواص فوتولومینسانس دزیمتری نیتريد کربن بور (کد مقاله : ۱۲۳۵)

شفیعی، سپیده - محقق پور، الهام - سجادی، سوده السادات
سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

در این مقاله پودر نیتريد کربن بور (BCN) با دوپ کردن بور در ساختار گرافیت کربن نیتريد ($g-C_3N_4$) به روش بسپارش تراکمی سنتز شد. تغییرات در مشخصه فوتولومینسانس BCN تحت تابش گاما بررسی شد. نمونه‌ها در بازه دز ۳۰ تا ۳۰۰۰ گری در گاما سل با چشمه کبالت-۶۰ پرتو دهی شدند. با توجه به تغییر خواص فوتولومینسانس BCN تحت تابش پرتو گاما، امکان استفاده از این ترکیب به عنوان دزیمتر در این بازه بررسی شد. از آنجایی که BCN دارای دو باند نشر در ۵۲۰ و ۶۳۸ نانومتر است، تغییرات در طیف فوتولومینسانس نمونه‌های پرتو دهی شده با رویکرد فلورسانس نسبت سنجی کمی سازی شد. منحنی کالیبراسیون در سه بازه مختلف دز به صورت خطی رسم شد و ضریب همبستگی به عنوان معیار کیفیت مدل در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که BCN در محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰ گری و ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری قابلیت استفاده به عنوان دزیمتر را دارد.

کلمات کلیدی: نیتريد کربن بور (BCN)، پرتو گاما، دز جذبی، فوتولومینسانس.

Study of the photoluminescence dosimetry of boron carbon nitride

Shafiei, Sepideh, Mohaghehpour, Elham*, Sadjadi, Sodeh

Atomic Energy Organization, Nuclear Sciences and Technologies Research Institute,
Radiation Application Research Center

Abstract:

In this paper, boron carbon nitride (BCN) was synthesized by doping boron into $g-C_3N_4$ using the polycondensation method. The samples were irradiated in a dose range of ۳۰-۳۰۰۰ Gy in a gamma cell with a cobalt-۶۰ source. The ability of this compound as a dosimeter was examined. BCN has two emission bands at ۵۲۰ and ۶۳۸ nm, So the changes in the PL spectrum of the irradiated samples were quantified using a radiometric approach. The linear calibration curve was plotted in different dose ranges, and the correlation coefficient was considered as the quality of the model. The results showed that BCN can be used as a dosimeter in the range of ۳۰-۳۰۰ and ۱۲۰۰-۳۰۰۰ Gy.

Key words: Boron carbon nitride (BCN), Gamma radiation, Absorbed dose, Photoluminescence



۱- مقدمه:

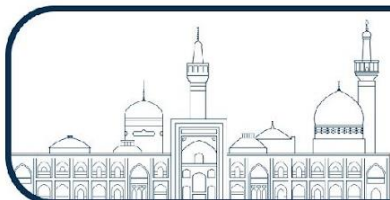
پرتو‌آوری تکنولوژی استفاده از پرتو یونیزان به منظور استریل کردن محصولات پزشکی و مواد غذایی، مرمت آثار باستانی میراث فرهنگی، بهبود محصولات کشاورزی، اصلاح پلیمرها و تصفیه آب است. مقدار دزی که در این فرایندها مورد استفاده قرار می‌گیرند بسته به کاربرد آن متفاوت است. برای مثال مهار جوانه زدن پیازها، گیاهان ریشه‌ای، غیرفعال‌سازی برخی انگل‌های بیماری‌زا در ماهی، و درمان القای جهش در گیاهان را می‌توان با استفاده از دز پایین (کمتر از ۱ کیلوگری) به دست آورد. پرتودهی مواد غذایی با دزهای متوسط (۱ تا ۱۰ کیلوگری) اثری مانند پاستوریزه کردن دارد و بدین ترتیب زمان ماندگاری مواد غذایی را افزایش می‌دهد. پلیمریزاسیون، اصلاح پلیمر، استریل کردن محصولات مراقبت‌های بهداشتی و تصفیه فاضلاب با پرتودهی با دز بالا (بیشتر از ۱۰ کیلوگری) انجام می‌شود [۱].

اثر بخشی فرایند پرتودهی به مقدار مناسب دز جذب شده و صحت اندازه‌گیری بستگی دارد. برای اطمینان از اینکه فرایند تابش تحت کنترل است و دز صحیح بوسیله یک محصول خاص دریافت شده است، در تاسیسات پرتو‌آوری از دزیمتری غیر فعال استفاده می‌شود. دزیمترها بر روی سطوح بیرونی جعبه‌های محصولات قرار داده می‌شود. هنگامی که دزیمتر تحت تابش قرار می‌گیرد، خواص فیزیکی یا شیمیایی آنها تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری این تغییرات می‌توان دز جذب شده را محاسبه کرد. دزیمترهای غیر فعال بر اساس روش خوانششان به سه دسته تشدید پارامغناطیس الکترون، سیگنال‌های الکتریکی و نوری طبقه‌بندی می‌شوند. دزیمتری بر اساس سیگنال‌های نوری به دو دسته دزیمتری لومینسانس و دزیمتری فوتوکرومیک تقسیم می‌شود. در این دزیمترها شدت نور گسیل شده با دز جذب شده متناسب است. دزیمتری لومینسانس را می‌توان به سه دسته ترمولومینسانس، لومینسانس تحریک شده نوری و رادیوفوتولومینسانس تقسیم کرد [۲]. مهمترین ویژگی دزیمترهای لومینسانس حساسیت بالای آنها به دزهای پایین، مقاومت در برابر رطوبت و میدان‌های مغناطیسی بالا، خطی بودن پاسخ آنها، حساسیت به پرتوهای مختلف و قابلیت استفاده مجدد آنها است [۳].

موادی که دارای خواص فوتولومینسانسی هستند شامل رنگ‌ها، پلیمرها، پروتئین‌ها، نانوکریستال‌های نیمه هادی کلئیدی (به اصطلاح نقاط کوانتومی)، کمپلکس‌های لانتانید، نانوذرات سیلیکا و نانو ذرات مبتنی بر کربن هستند [۴]. مواد مبتنی بر کربن در سال‌های اخیر به دلیل مزایای استثنایی مانند جذب نوری بالا، پایداری شیمیایی، سازگاری زیستی، سمیت پایین، سهولت در تهیه توجه بیشتری را جلب کرده‌اند. این مواد عمدتاً شامل نقاط کربن، نانو ذرات الماس، نانو لوله‌های کربنی، فولرین و گرافن هستند [۵].

تاکنون اثر تابش بر خواص فوتولومینسانسی برخی مواد و قابلیت آنها جهت استفاده به عنوان دزیمتر در دزهای مختلف مطالعه شده است. خواص فوتولومینسانس نانوذرات CdSe/ZnS در اثر پرتودهی با پرتو گاما با دزهای مختلف ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ گری [۶]، ۱۳۳/۲ کیلو راد [۷] و بازه صفر تا ۱/۳ کیلوگری [۸] در تحقیقات مختلف مطالعه شده است. اثر دزهای کمتر از ۲۰ گری بر خواص فوتولومینسانس گرافیت توسط برادلی و همکارانش [۹] و همچنین سانی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. تغییرات خواص فوتولومینسانس نقاط کوانتومی گرافن که در معرض پرتو گاما با دزهای کمتر از ۱۵ کیلوگری [۱۱] و ۵۰۰ کیلوگری [۱۲] قرار گرفته‌اند در مقالات مختلف گزارش شده است.

بیشتر این مواد که دارای خواص فوتولومینسانسی هستند دارای یک باند نشر فلورسنت می‌باشند. اما برخی از مواد دارای دو باند نشر فلورسنت هستند. در این مواد از استراتژی فلورسانس نسبت سنجی استفاده می‌شود که در آن از نسبت دو پیک نشر به عنوان سیگنال حسگر استفاده می‌شود. در این روش در مقایسه با روش معمول که در آن از یک طول موج نشر برای سنجش استفاده می‌شود تداخلات ناشی از عوامل مختلف از جمله هر گونه تغییر در شرایط محیطی یا دستگاه، نمی‌تواند بر صحت تشخیص تأثیر بگذارد. بنابراین در این روش حساسیت و صحت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد [۱۳]. حسگرهای فلورسانس نسبت سنجی را می‌توان با ترکیب دو ماده فلورسنت یا یک ماده با نشر دوگانه طراحی کرد.



نشان داده شده است که گرافیت کربن نیتريد ($g-C_3N_4$) با ناخالصی بور دارای دو باند نشر فلورسنت می‌باشد [۱۴]. پرز و همکارانش نشان دادند که در محدوده دزهای پایین (۰/۱ تا ۳/۲۵ گری) از نانو ذرات گرافیت کربن نیتريد می‌توان برای دزیمتری پرتوهای گاما استفاده کرد [۱۵].

در این تحقیق ماده نیتريد کربن بور BCN سنتز شد. اثر پرتو گاما در محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰۰ گری بر طیف فوتولومینسانس BCN بررسی شد. نتایج نشان دادند که BCN در بازه‌های ۳۰ تا ۳۰۰ گری و همچنین ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری قابلیت بکارگیری به عنوان دزیمتر را دارد. در نتیجه می‌توان از BCN به عنوان دزیمتر برای مصارف پرتو دهی خون و محصولات کشاورزی و باغی استفاده کرد.

۲- روش کار:

۲-۱- سنتز نیتريد کربن بور (BCN)

در ابتدا پودر $g-C_3N_4$ به روش اسپارش تراکمی با حرارت دادن دی‌سیان‌دی‌آمید در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت با نرخ حرارت دهی ۲/۲ درجه سانتی‌گراد در دقیقه سنتز شد. سپس ۳ گرم از این پودر به ۱۰۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر اضافه شد و ۰/۹ گرم اسید بوریک با آن مخلوط شد. برای توزیع یکنواخت ذرات در آب، مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار داده شد. سپس تحت همزدن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا آب آن تبخیر شود. پیش ماده بدست آمده در بوته آلومینیومی درب دار ریخته و با نرخ ۳/۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه در کوره موفلی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت جو نیتروژن کلسینه شد. در نهایت اجازه داده شد تا دمای سیستم بطور طبیعی با دمای اتاق هم دما شود. مشخصه یابی پودر BCN سنتز شده به وسیله پراش پرتو ایکس و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) بررسی شد.

۲-۲- پرتو دهی نمونه‌ها

مقدار مساوی از نمونه بدست آمده در میکروتیوب‌های مختلف ریخته شد و با چشمه کبالت-۶۰ در گاما سل ۲۲۰ پرتو دهی شد. میانگین انرژی پرتوهای گامای چشمه کبالت-۶۰، ۱/۲۵ مگا الکترون ولت است. آهنگ دز این چشمه ۰/۶ گری بر ثانیه است. گاما سل با استفاده از دزیمتر مرجع سولفات آهن (فریک) کالیبره شده است (ASTM standard practice E1۰۲۶T, ۲۰۰۴). نمونه‌ها با دزهای جذبی از ۳۰ تا ۳۰۰۰ گری پرتو دهی شدند. یک نمونه پرتو دهی نشده به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد.

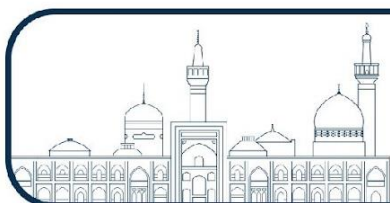
۲-۳- اندازه‌گیری فوتولومینسانس

طیف‌های فوتولومینسانس با استفاده از اسپکتروفتومتر فلورسانس FL-Am-۲۰ بوسیله کووت کواترز با طول ۱۰ میلی‌متر و حجم ۳/۵ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد. ابتدا مقدار مشخصی از نمونه‌های پرتو دهی شده و همچنین نمونه کنترل به آب مقطر اضافه شد تا غلظت نهایی ۱ میلی گرم در میلی لیتر بدست آید. سپس نمونه‌ها برای چند ثانیه در معرض امواج فراصوت قرار گرفتند تا محلول یکنواختی بدست آید. آنگاه طیف‌های فوتولومینسانس نمونه‌ها در دمای اتاق گرفته شد.

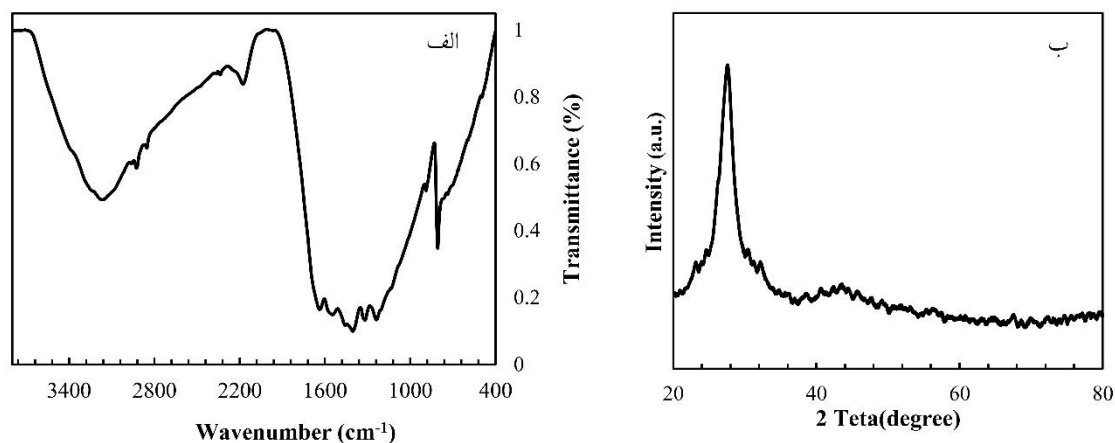
۳- نتایج:

۳-۱- مشخصه یابی

شکل ۱ الف طیف FT-IR نمونه BCN سنتز شده را نشان می‌دهد. پیک پهن مشاهده شده در حدود 3189 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل و N-H، گروه‌های B-OH و N-H سطح و آب جذب شده سطحی نسبت داد. نوار جذب قوی در 2184 cm^{-1} وجود ارتعاش کششی $C\equiv N$ را نشان می‌دهد. باند جذب در 1411 cm^{-1} مربوط به کشش پیوند C-



N است و پیک 1237 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاش پیوند B-O نسبت داد. نوار جذب مشاهده شده در 807 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی داخل صفحه‌ای گروه B-N-B است.



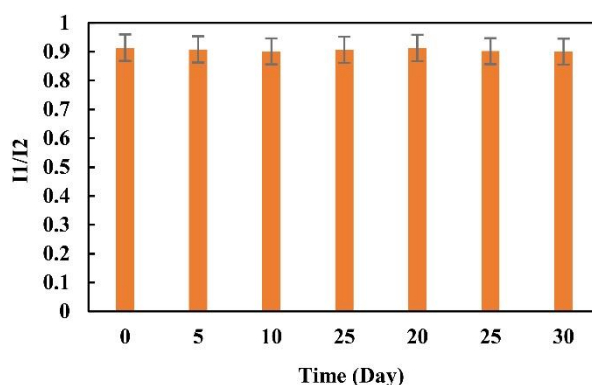
شکل (۱) الف) طیف FT-IR، ب) الگوی پراش XRD نمونه BCN سنتز شده.

شکل ۱ ب) الگوی XRD پودر BCN سنتز شده را نشان می‌دهد. پیک تیز در 27.6° (2θ) مربوط به صفحات (۱۱۰) نیتريد کربن گرافیتی است و پیک 43.9° (2θ) را می‌توان به صفحات (۱۱۱) در BCN نسبت داد.

۳-۲- بررسی خواص دزیمتری BCN

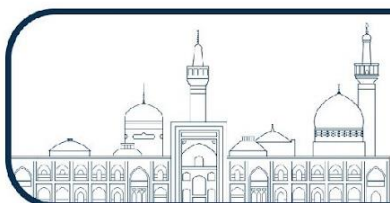
قبل از مطالعه رفتار دزیمتر BCN، بررسی خواص نوری آن انجام شد. نشر فلورسانس BCN طی ۱ ماه ثبت شد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شدت فلورسانس BCN در دو طول موج نشر ۵۲۲ و ۶۳۸ نانومتر در بازه‌های زمانی مختلف تغییرات اندکی دارد که نشان می‌دهد خاصیت نشر این دزیمتر تقریباً در طول این دوره زمانی ثابت می‌ماند.

بازده کوانتومی BCN با استفاده از کوینون سولفات ($QY = 0.54$) در اسید سولفوریک یک مولار) به عنوان مرجع در طول موج برانگیختگی ۳۶۰ نانومتر محاسبه شد و برابر با ۱۴/۴ درصد بود.



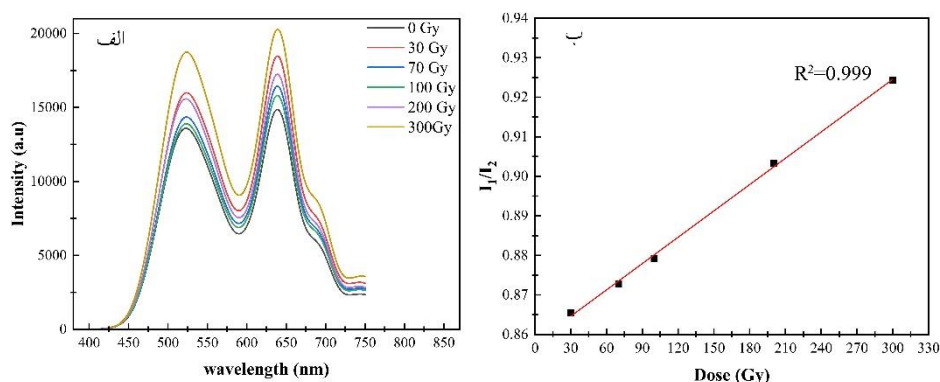
شکل (۲) اثر زمان بر خواص فتولومینسانس BCN.

عملکرد دزیمتر سنتز شده برای سنجش کمی پرتوی گاما در محدوده دزهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. شدت فلورسانس نمونه‌ها در محلول آبی پس از یک دقیقه پس از پایدار شدن اندازه‌گیری شد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است،

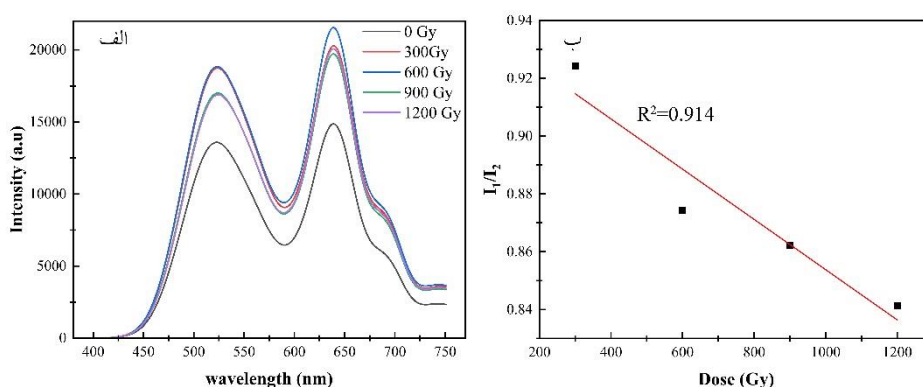


شدت هر دو پیک فلورسانس در طول موج ۵۲۲ و ۶۳۸ نانومتر با افزایش دز جذبی در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ گری به تدریج افزایش می‌یابد. هرچند یک رابطه خطی بین افزایش شدت پیک اول یا دوم در طیف فلورسانس نمونه‌ها با دز جذبی مشاهده نشد اما رابطه خطی بین نسبت شدت دو پیک ۱۵۲۲/۱۶۳۸ (۱۱/۱۲) و میزان دز جذبی در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ گری وجود دارد. بنابراین بهترین روش استفاده از استراتژی فلورسانس نسبت سنجی است.

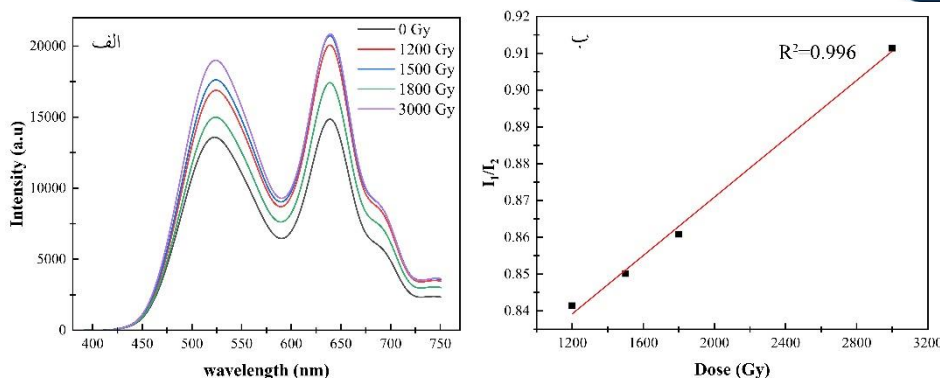
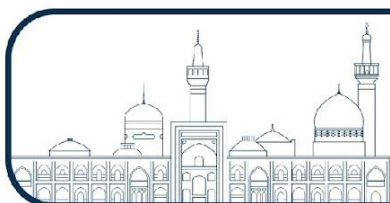
به طور مشابه افزایش شدت فلورسانس در دو محدوده دز جذبی ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ گری و ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری نیز مشاهده شد (شکل ۴ و ۵). با این تفاوت که روند نسبت شدت فلورسانس ۱۵۲۲/۱۶۳۸ در محدوده ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ گری با افزایش دز جذبی نزولی است.



شکل (۳) (الف) طیف‌های فلورسانس BCN قبل و پس از پرتودهی با دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰ گری، (ب) روابط متناظر بین نسبت شدت فلورسانس ۱۱/۱۲ و دز جذبی.



شکل (۴) (الف) طیف‌های فلورسانس BCN قبل و پس از پرتودهی با دز جذبی ۳۰ تا ۱۲۰۰ گری، (ب) روابط متناظر بین نسبت شدت فلورسانس ۱۱/۱۲ و دز جذبی.



شکل (۵) (الف) طیف‌های فلورسانس BCN قبل و پس از پرتودهی با دز جذبی ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری، (ب) روابط متناظر بین نسبت شدت فلورسانس I_1/I_2 و دز جذبی.

۴- نتیجه گیری:

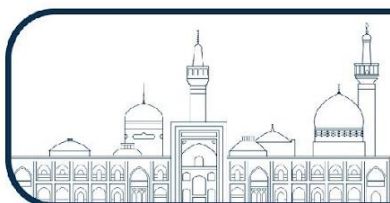
در این تحقیق با دوپ کردن بور در ساختار $g-C_3N_4$ به روش اسپارش تراکمی، نیتريد کربن بور سنتز شد. با وارد کردن اتم بور، تفاوت چشمگیری در نشر فلورسانس BCN نسبت به $g-C_3N_4$ مشاهده شد. هنگامی که با طول موج ۳۶۰ نانومتر برانگیخته می‌شود دو بیشینه نشر را نشان می‌دهند: یکی در ۵۲۰ نانومتر و دیگری در ۶۳۸ نانومتر در حالیکه $g-C_3N_4$ تنها یک پیک نشری در حدود ۵۲۰ نانومتر دارد. مشاهده باندهای نشر چندگانه امکان استفاده از نسبت شدت را در دو طول موج فراهم می‌سازد، این رویکرد به طور چشمگیری آنالیز کمی سیگنال فلورسانس را بهبود می‌بخشد.

بررسی‌های اولیه نشان داد که خواص فوتولومینسانس ترکیب BCN هنگامیکه در معرض پرتو گاما قرار می‌گیرد تغییر می‌کند. بر این اساس امکان استفاده از این ترکیب به عنوان دزیتر در سه محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰ گری، ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ گری و ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری با استفاده از استراتژی فلورسانس نسبت سنجی مورد مطالعه قرار گرفت. برای داده‌های بدست آمده از نمونه‌های پرتودهی شده در بازه‌های مختلف دز، یک معادله خطی برازش شد. در منحنی‌های کالیبراسیون به‌دست آمده (نسبت شدت دو پیک (I_{522}/I_{638}) و میزان دز جذبی) در سه محدوده دز جذبی مختلف، ضریب همبستگی، R^2 به عنوان معیاری از کیفیت مدل است (خطی بودن) در نظر گرفته شد. مقادیر R^2 در سه محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰ گری، ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ گری و ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹، ۰/۹۱۴ و ۰/۹۹۶ بود. با توجه به این نتایج می‌توان از BCN در دو بازه دز جذبی ۳۰ تا ۳۰۰ گری و ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰ گری به عنوان دزیتر استفاده کرد.

۵- مراجع:

- [۱] Ergun, E., Journal of Fluorescence. ۲۰۲۱. ۳۱(۴): ۹۴۱-۵۰.
- [۲] Yang, Z., et al. Advanced Functional Materials. ۲۰۲۴. ۳۴(۴۱): ۲۴۰۶۱۸۶.
- [۳] Olko, P. Radiation Measurements, ۲۰۱۰. ۴۵(۳-۶): ۵۰۶-۵۱۱.
- [۴] Antonios, K., Panagiotis D. Formation Mechanism of Carbogenic Nanoparticles with Dual Photoluminescence Emission. ۲۰۱۲
- [۵] Zhu, S., et al. Angewandte Chemie International Edition. ۲۰۱۳. ۱; ۵۲(۱۴).
- [۶] Stodilka, R.Z., et al. The Journal of Physical Chemistry C, ۲۰۰۹. ۱۱۳(۶): ۲۵۸۰-۲۵۸۵.
- [۷] Withers, N.J., et al. in ۲۰۰۸ Conference on Lasers and Electro-Optics and ۲۰۰۸ Conference on Quantum Electronics and Laser Science. ۲۰۰۸. IEEE.
- [۸] Withers, N.J., et al. Applied Physics Letters, ۲۰۰۸. ۹۳(۱۷).
- [۹] Bradley, D., et al. Applied Radiation and Isotopes, ۲۰۲۱. ۱۷۴: ۱۰۹۷۶۹.
- [۱۰] Sani, S.A., et al. Radiation Physics and Chemistry, ۲۰۲۰. ۱۷۱: ۱۰۸۷۰۳.
- [۱۱] Jovanović, S., et al. Optical and Quantum Electronics, ۲۰۱۶. ۴۸: ۱-۷.
- [۱۲] Wang, T., et al. Journal of Materials Chemistry C, ۲۰۱۶. ۴(۴۴): ۱۰۵۳۸-۱۰۵۴۴.

- [۱۳] Park, S.-H., et al. Chemical Society Reviews, ۲۰۲۰. ۴۹(۱): ۱۴۳-۱۷۹.
- [۱۴] Azimi, E.B., et al. New Journal of Chemistry, ۲۰۱۹. ۴۳(۳۰): ۱۲۰۸۷-۱۲۰۹۳.
- [۱۵] Perez, M., et al. Applied Radiation and Isotopes, ۲۰۲۲. ۱۸۴: ۱۱۰۲۰۰.



مقایسه فیلترهای ترکیبی در سیستم تصویربرداری دهان و دندان جهت بهینه سازی طیف اشعه

ایکس، یک مطالعه شبیه سازی شده (کد مقاله : ۱۲۵۵)

حبیبی، مهشاد_ اسماعیلی، احمد

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

کاربرد فیلتراسیون در سیستم تصویربرداری باتوجه به نقش آن در تضعیف فوتون‌های اشعه ایکس کم انرژی و کاهش دز دریافتی بدن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رایج‌ترین نوع عکس‌برداری، عکس‌برداری پانورامیک است که با استفاده از یک چرخش واحد از اطراف سر بیمار، تصاویر دوبعدی از فک بالا و پایین را فراهم می‌کند. در این پژوهش به بررسی اثر فیلترهای ترکیبی جدید در دستگاه تصویربرداری پانورامیک از چهار نوع فیلتر آلومینیوم - مس، آلومینیوم - آهن، آلومینیوم - قلع و آلومینیوم - مولیبدن با ابزار شبیه سازی فلوکا، در انرژی ۸۰ کیلو الکترون‌ولت پرداخته شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بهترین انتخاب از نظر کاهش شدت و تضعیف پرتوهای کم انرژی فیلتر ترکیبی آلومینیوم و مس با ضخامت ۰.۵ میلی‌متر بود.

کلمات کلیدی: ابزار شبیه‌سازی فلوکا، اشعه ایکس، سیستم تصویربرداری دهان و دندان، فیلترهای ترکیبی

Comparison of Combinational Filters in Oral and Dental Imaging System for Optimization of X-ray Spectrum: A Simulation Study

Mahshad Habibi*, Ahmad Esmaili Torshabi

Graduate University of Advanced Technology, Faculty of Sciences and Modern Technology, Nuclear Engineering Department.

Abstract:

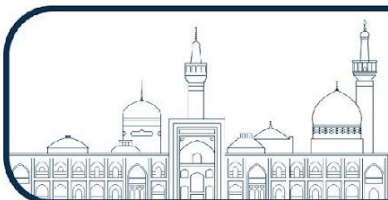
The application of filtration in imaging systems holds significant importance due to its role in attenuating low-energy X-ray photons and reducing the radiation dose absorbed by the body. The most widely used imaging technique is panoramic radiography, which generates two-dimensional images of the upper and lower jaws through a single rotation around the patient's head. This study investigates the effects of new combinational filters in panoramic imaging devices, utilizing four filter types: aluminum-copper, aluminum-iron, aluminum-tin, and aluminum-molybdenum. The investigation was conducted using the FLUKA simulation tool at an energy level of 80 keV. The research findings indicate that the aluminum-copper combinational filter, with a thickness of 0.5 mm, was the most effective in reducing radiation intensity and attenuating low-energy rays.

Key words: Fluka simulation tool, X-rays, oral and dental imaging systems, combinational filters



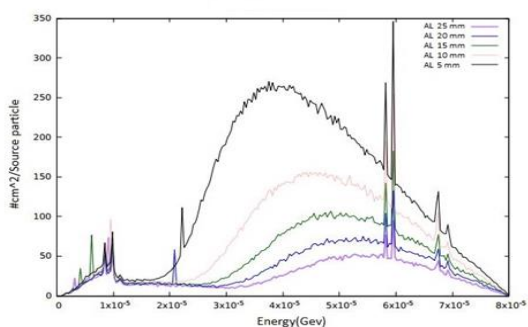
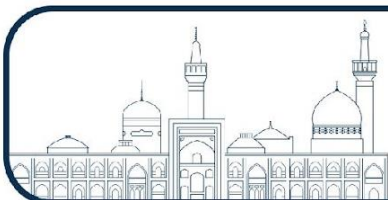
۱- مقدمه

حفاظت در مقابل اشعه و کاهش پرتوگیری یکی از اهداف مهم در رادیولوژی است که منجر به کاهش دُز رسیده به بیمار می‌شود [۱]. اشعه ایکس به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در پزشکی بالینی شناخته می‌شود. این اشعه در دو زمینه اصلی، یعنی تصویربرداری و پرتودرمانی، کاربردهای فراوانی دارد [۲]. اشعه X در سال ۱۸۹۵ کشف شد. زمانی که اختلاف ولتاژ زیادی بین کاتد و آند برقرار می‌شود، الکترون‌های آزاد شده از کاتد با شتاب به سمت آند حرکت می‌کنند. این حرکت سریع الکترون‌ها، انرژی بالایی را به همراه دارد. زمانی که این الکترون‌ها به آند برخورد می‌کنند، انرژی خود را آزاد می‌کنند و این انرژی به شکل اشعه X منتشر می‌شود [۳]. در پرتوهای اشعه ایکس، فوتون‌ها با انرژی‌های مختلف وجود دارند که میزان قدرت نفوذ آن‌ها را مشخص می‌کند. فوتون‌های کم‌انرژی در لایه‌های سطحی پوست و بافت‌های نزدیک به سطح جذب می‌شوند و ممکن است باعث افزایش دما یا تغییرات شیمیایی در این بافت‌ها شوند. در مقابل، فوتون‌های پرانرژی‌تر می‌توانند به لایه‌های عمیق‌تر نفوذ کنند یا از بدن خارج شوند. به همین دلیل، انتخاب دقیق پارامترهایی مانند انرژی اشعه و مدت زمان تابش بسیار مهم است تا از آسیب به بافت‌های سالم جلوگیری شود [۴-۶]. جذب ناخواسته فوتون‌های کم‌انرژی در پرتو ایکس می‌تواند خطرات جدی، از جمله افزایش ریسک سرطان، به همراه داشته باشد. برای کاهش این خطر و بهینه‌سازی کیفیت تصویر، استفاده از فیلترها ضروری است. فیلترها فوتون‌های کم‌انرژی و ناخواسته را جذب کرده و تنها فوتون‌های با انرژی بالا را عبور می‌دهند. این اقدام ضمن کاهش عوارض جانبی و خطرات تابش، دقت تصویربرداری را افزایش می‌دهد و فیلترها را به ابزاری کلیدی در بهبود ایمنی و کیفیت تصویربرداری پزشکی تبدیل می‌کند [۶-۹]. میزان فیلتراسیون اشعه ایکس بر اساس کیلوولتاژ مورد استفاده برای تولید آن تعیین می‌شود. ضخامت مواد فیلتر به عدد اتمی و تنظیمات کیلوولتاژ بستگی دارد [۱۰]. فیلترها معمولاً از یک صفحه فلزی تشکیل شده‌اند که بین بیمار و لامپ اشعه ایکس قرار می‌گیرند. دسته اشعه ایکس با استفاده از مواد جاذب در دستگاه، در سطوح مختلف فیلتر می‌شوند. این فرآیند از منبع اشعه آغاز می‌شود و شامل حفاظ لامپ اشعه ایکس (فیلتراسیون ذاتی) و صفحات فلزی در مسیر اشعه (فیلتراسیون اضافی) است. معیارهای متفاوتی برای انتخاب فیلتر مناسب وجود دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود کنتراست، قدرت تفکیک و افزایش نسبت سیگنال به نویز اشاره کرد. تنوع فیلترهای موجود و تفاوت گسترده در کیفیت تصاویر، شرایط پیچیده‌ای را برای انتخاب و تنظیم فیلتر ایجاد می‌کند [۱۱]. تلاش‌های متعددی برای رسم طیف اشعه ایکس با استفاده از روش‌های محاسباتی از سال ۱۹۲۳ آغاز شده است [۱۲]. با پیشرفت سخت‌افزارها و روش‌های کامپیوتری، تولید طیف‌های دقیق‌تر اشعه ایکس امکان‌پذیر شده است. روش‌های محاسباتی به سه دسته تجربی، نیمه‌تجربی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو تقسیم می‌شوند. روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی با وجود سرعت بالا، در مدل‌سازی هدف و فیلترها محدودیت دارند. از سوی دیگر، شبیه‌سازی مونت‌کارلو این محدودیت‌ها را ندارد و کدهایی مانند فلوکا (FLUKA) برای تولید اشعه ایکس استفاده می‌شوند [۱۳]. برای انجام این تحقیق، از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلوی فلوکا استفاده گردید. نرم‌افزار فلوکا یکی از کدهای چندمنظوره مونت‌کارلو می‌باشد که می‌تواند برای تولید طیف اشعه ایکس به کار برود. در این پژوهش، به‌منظور تعیین فیلتراسیون بهینه در تصویربرداری دهان و دندان به روش پانورامیک که با استفاده از یک چرخش واحد از اطراف سر بیمار، تصاویر دوبعدی از فک بالا و پایین را فراهم می‌کند، در ابتدا تیوپ اشعه ایکس با آند تنگستن طراحی گردید. سپس از فیلترهای ترکیبی با ضخامت‌های مختلف در انرژی ۸۰ کیلوالکترون‌ولت که در محدوده کاری دستگاه است، برای بررسی میزان عبور اشعه ایکس با نرم‌افزار فلوکا طراحی و سپس مورد بررسی قرار گرفت.

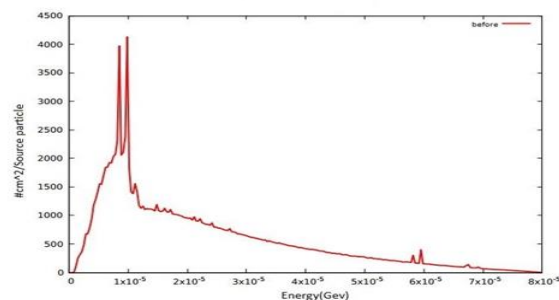


۲-۱- کد شبیه‌ساز فلوکا

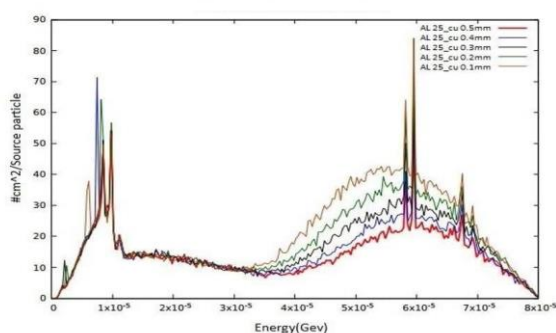
کد FLUKA یک نرم‌افزار چندمنظوره است که برای محاسبه ترابرد ذرات و تعاملات آن‌ها با مواد مختلف طراحی شده است. این کد در زمینه‌های متنوعی از جمله رادیولوژی، رادیوتراپی و پزشکی هسته‌ای کاربرد دارد. علاوه بر محاسبات اصلی، FLUKA می‌تواند برای شبیه‌سازی حفاظ‌ها، شتاب‌دهنده‌های الکترون و پروتون، طراحی هدف، کالری‌متری، محاسبه اکتیویته، دزیمتری، طراحی آشکارساز، تابش‌های کیهانی و فیزیک نوترینو نیز استفاده شود. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی ۶۰ نوع ذره با دقت بالا را دارد که شامل فوتون‌ها و الکترون‌ها (در دامنه ۱ کیلو الکترون‌ولت تا هزاران ترا الکترون‌ولت)، نوترینوها و میون‌ها در هر دامنه انرژی، هادرون‌ها تا انرژی ۲۰ ترا الکترون‌ولت و همچنین آنتی‌ذرات، نوترون‌ها و یون‌های سنگین می‌باشد. کد FLUKA همچنین دارای یک رابط گرافیکی کاربرپسند به نام FLAIR است که امکان تعریف هندسه‌ها و انجام سایر کدنویسی‌ها را فراهم می‌کند [۱۴، ۱۵]. در این پژوهش با استفاده از کد شبیه‌ساز فلوکا، ابتدا بیم الکترونی با انرژی ۸۰ الکترون‌ولت با سطح مقطع (0.05×0.05) سانتی متر مربع به آند که از جنس تنگستن می‌باشد برخورد کرده است خارج از آند دو منطقه به نام قبل و بعد تعریف کرده که فیلترهای ترکیبی که از جمله مس، آهن، مولیبدن و قلع با چگالی‌های ۸.۹۶، ۷.۸۷، ۱۰.۲۸ و ۷.۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب که هر کدام به صورت جداگانه به شکل پوسته با ضخامت‌های ۰.۱ تا ۰.۵ میلی‌متر برای مس و آهن، ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ میلی‌متر برای مولیبدن و قلع خارج از منطقه قبل و بین منطقه بعد تعریف شده است که مش‌بندی آن به صورت ۱۰۰ قسمت در هر محور مختصات (X,Y,Z) که یک میلیون وکسل به وجود می‌آورد و تعداد ذره‌ها با ۱ میلیون اجرا شد که باعث افزایش دقت در خروجی که برای کل هندسه تعریف شده است، تا انرژی ۸۰ کیلو الکترون‌ولت انجام شد. محدوده ولتاژ دستگاه معمولاً بین ۶۰ تا ۹۰ kVp است. انتخاب انرژی ۸۰ کیلو الکترون‌ولت به این دلیل بود که در محدوده کاری این دستگاه وجود دارد. در این حالت، دستگاه در محدوده ۸۰ kVp تنظیم شده است. این مقدار بهینه برای نفوذ کافی در بافت‌های فک و دندان است. جریان لامپ اشعه ایکس معمولاً بین ۴ تا ۱۶ میلی‌آمپر (mA) تنظیم می‌شود. برای ۸۰ kVp، مقدار جریان معمولاً حدود ۸ تا ۱۲ mA انتخاب می‌شود. زمان تابش معمولاً بین ۵ تا ۲۰ ثانیه است. این زمان بستگی به نوع دستگاه و ضخامت بافت بیمار دارد.



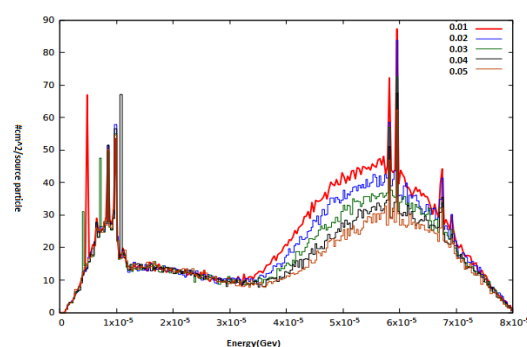
شکل (۲) بعد از فیلتر آلومینیوم تک لایه با ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ میلی متر



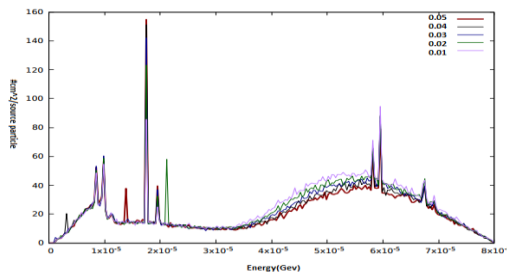
شکل (۱) طیف اشعه ایکس قبل از فیلتر



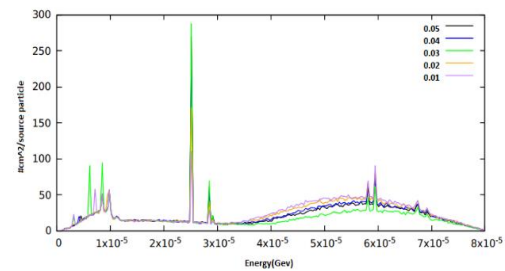
شکل (۴) اثر فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-مس، که ضخامت مس از ۰.۱ میلی متر تا ۰.۵ میلی متر



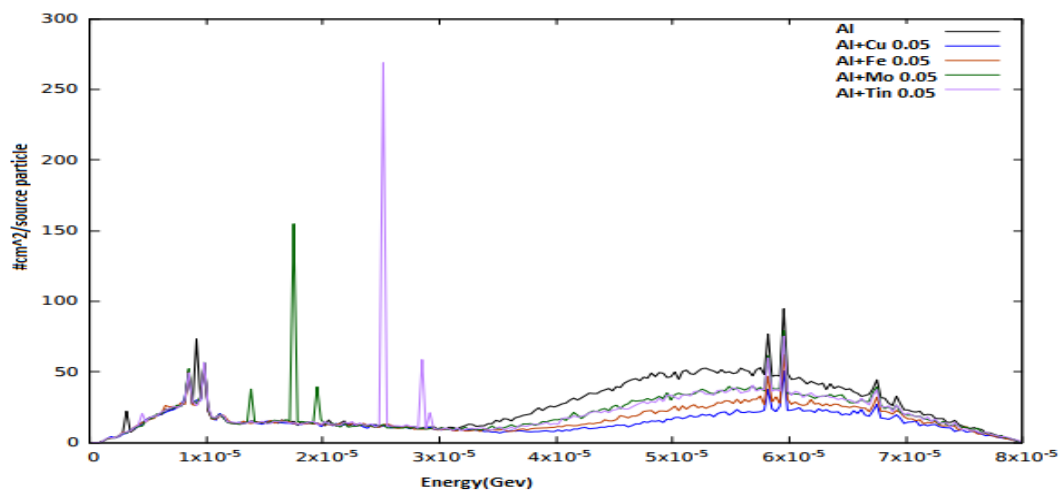
شکل (۳) فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-آهن، که ضخامت آهن از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر



شکل (۶) فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-مولیبدن، که ضخامت مولیبدن از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر



شکل (۵) فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-قلع، که ضخامت قلع از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر



شکل (۷) مقایسه فیلترهای دو لایه با یکدیگر

۳- نتایج

در این تحقیق هدف، تولید اشعه ایکس با انرژی ۸۰ کیلو الکترون ولت به روش تولید بیم الکترونی و برخورد به هدف تنگستن است. با شبیه‌سازی بیم الکترونی و برخورد آن به هدف تنگستن موجب می‌شود خروجی‌های حاصل از کد با حالت واقعی تولید اشعه ایکس مطابقت داشته باشد پس از تولید اشعه ایکس ترمزی به بررسی تاثیر فیلترهای ترکیبی پرداخته شد که پس از استخراج از کد فلوکا مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در ابتدا طیف اشعه ایکس بدون فیلتر را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید و سپس بعد از فیلتر آلومینیوم با ضخامت ۵ تا ۲۵ میلی متر که رایج ترین نوع فیلتر در این دستگاه است برای شبیه‌سازی انتخاب شد که تغییرات طیف انرژی را در شکل ۲ مشاهده می‌کنید. سپس اثر فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-آهن، که ضخامت آهن از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر به دلیل سنگین بودن و افزایش عدد اتمی نسبت به مس و آلومینیوم در این محدوده انتخاب شده است. دلیل انتخاب مس رایج نبودن آن و صرفاً برای مقایسه و نوآوری انتخاب شد که در شکل ۳، اثر فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-مس، که ضخامت مس از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۵ میلی متر را در شکل ۴، اثر فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-قلع،



که ضخامت قلع از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر در شکل ۵، اثر فیلترهای ترکیبی آلومینیوم-مولیبدن، که ضخامت مولیبدن از ۰.۰۱ میلی متر تا ۰.۰۵ میلی متر را در شکل ۶ مشاهده می کنید که دلیل انتخاب مولیبدن به دلیل نزدیکی انرژی این دستگاه به دستگاه ماموگرافی بود که از این جنس فیلتر استفاده میکند. تیوپ اشعه ایکس با ولتاژ ۸۰ کیلو الکترون ولت و آند آن از جنس تنگستن شبیه سازی شد. در شبیه سازی دو بخش قبل از فیلتر و بعد از اعمال فیلتر در نظر گرفته شد و طیف اشعه ایکس بر روی نمودار ترسیم شد. اثر فیلتراسیون با افزایش ضخامت های هر فیلتر ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت. در هنگام مقایسه فیلتر آلومینیوم با یکدیگر فیلتر یا ضخامت ۲۵ میلی متر مناسب برای فیلتراسیون در بین فیلترهایی از جنس آلومینیوم می باشد. همچنین در مقایسه فیلترهای ترکیبی از جنس آلومینیوم ۲۵ میلی متر و مس که از ضخامت های ۰.۱ تا ۰.۵ میلی متر بود بهترین ضخامت مس، ۰.۵ میلی متر است. در مقایسه فیلترهای ترکیبی از جنس آلومینیوم ۲۵ میلی متر - آهن، قلع و مولیبدن که از ضخامت های ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ میلی متر بود؛ بهترین ضخامت، ۰.۰۵ میلی متر است به دلیل تضعیف بیشتر در پرتوهای کم انرژی و افزایش میانگین پرتوهای پر انرژی یا به عبارت دیگر شیف دادن منحنی به سمت راست که منجر به کاهش دز بیمار می شود. ضخامت بهینه فیلترها بر اساس ضریب تضعیف مواد و نیاز به حفظ کیفیت تصویر تعیین شد. برای مثال، فیلتر آلومینیوم-مس با ضخامت ۰.۵ mm، میزان مناسبی از تضعیف فوتون های کم انرژی (کاهش دز بدن) و حفظ فوتون های پر انرژی (بهبود کنتراست تصویر) فراهم آورد. این ضخامت با تحلیل مقدار تضعیف تجمعی (Attenuation Length) هر ماده و مقایسه آن با طیف اشعه ایکس ورودی تعیین گردید.

۴- بحث و نتیجه گیری

یکی از نگرانی های اصلی در تصویربرداری، خطر ابتلا به سرطان ناشی از تابش مستقیم اشعه ایکس با دز بالا به بدن بیمار است. این تابش می تواند تأثیرات منفی بر سلامت فرد داشته باشد و نیاز به دقت بیشتری در استفاده از این روش را ضروری می سازد. به همین دلیل، انتخاب فیلتر به عنوان یکی از مهم ترین مراحل پردازش داده ها در تصویربرداری اهمیت دارد [۱۶]. فیلتر آلومینیوم که فیلتر رایج در دستگاه پانورامیک است با فیلتر مس و آهن که مرسوم نمی باشد، به دلیل نوآوری و مقایسه با دیگر فیلتر ها انتخاب شدند. فیلتر مولیبدن به دلیل نزدیکی انرژی طیف انتخابی به انرژی دستگاه ماموگرافی انتخاب شد و فیلتر قلع به دلیل خواص فیزیکی مناسب که دارای عدد اتمی ($Z=50$) نسبتاً بالایی و یکی از فیلترهای رایج در دستگاه های تصویربرداری است که آن را برای جذب پرتوهای کم انرژی مناسب می کند. اثر فیلترهای اعمال شده با ضخامت های ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی متر برای آلومینیوم ۰.۵، ۰.۴، ۰.۳، ۰.۲ و ۰.۱ میلی متر برای مس در فیلتر ترکیبی، ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ میلی متر برای آهن، قلع و مولیبدن در نرم افزار شبیه ساز فلوکا مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا تیوپ اشعه ایکس با ولتاژ ۸۰ کیلو الکترون ولت که در محدوده کاری دستگاه پانورامیک است و آند آن از جنس تنگستن شبیه سازی شد. در شبیه سازی دو بخش قبل از فیلتر و بعد از اعمال فیلتر در نظر گرفته شد و طیف اشعه ایکس بر روی نمودار ترسیم شد. اثر فیلتراسیون با افزایش ضخامت های هر فیلتر مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق اثر ضخامت های متفاوت فیلتر را با همدیگر در ضخامت های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت در هنگام مقایسه فیلترهای آلومینیوم با یکدیگر فیلتر یا ضخامت ۲۵ میلی متر مناسب برای فیلتراسیون در بین فیلتر هایی از جنس آلومینیوم می باشد چرا که موجب کاهش پرتوهای کم انرژی بیشتری شده است. مطابق با شکل ۷ بهترین انتخاب از نظر کاهش شدت و تضعیف پرتو های کم انرژی فیلتر ترکیبی آلومینیوم و مس با ضخامت ۰.۵ میلی متر بود. مولیبدن و قلع به دلیل ایجاد پرتو ایکس شاخصه ممکن است مناسب نباشد لیکن به دلیل نزدیک بودن پیک انرژی به آلومینیوم تنها، ممکن است کیفیت تصویری مشابه با دستگاه هایی که از فیلتر رایج آلومینیوم با ضخامت ۲۵ میلی متر استفاده می کنند، ایجاد کنند.

۵- مراجع

- [۱] M. Nooshadian, H. Taghavi, H. Alavi, N. Bishesary, S. Mousavi, and A. Koomasi, "Evaluation of Filtration Rates in Radiology Devices Used in Hospitals Affiliated to Babol



University of Medical Sciences, Iran," Journal of Babol University of Medical Sciences, vol. ۱۷

[۲] F. H. Attix, Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. John Wiley & Sons, ۲۰۰۸.

[۳] F. A. Mettler Jr et al., "Radiologic and nuclear medicine studies in the United States and worldwide: frequency, radiation dose, and comparison with other radiation sources—۱۹۵۰–۲۰۰۷," Radiology, vol. ۲۵۳, no. ۲, pp. ۵۲۰–۵۳۱, ۲۰۰۹

[۴] M. Asadinezhad and M. T. Bahreyni Toossi, "Doses to patients in some routine diagnostic X-ray examinations in Iran: proposed the first Iranian diagnostic reference levels," Radiation protection dosimetry, vol. ۱۳۲, no. ۴, pp. ۴۰۹–۴۱۴, ۲۰۰۸.

[۵] D. Shahbazi-Gahrouei and M. Baradaran-Ghahfarokhi, "Assessment of entrance surface dose and health risk from common radiology examinations in Iran," Radiation protection dosimetry, vol. ۱۵۴, no. ۳, pp. ۳۰۸–۳۱۳, ۲۰۱۳.

[۶] B. Rasuli, A. Mahmoud-Pashazadeh, M. Ghorbani, R. T. Juybari, and M. Naserpour, "Patient dose measurement in common medical X-ray examinations in Iran," Journal of applied clinical medical physics, vol. ۱۷, no. ۱, pp. ۳۷۴–۳۸۶, ۲۰۱۶.

[۷] A. J. Einstein, M. J. Henzlova, and S. Rajagopalan, "Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from ۶۴-slice computed tomography coronary angiography," Jama, vol. ۲۹۸, no. ۳, pp. ۳۱۷–۳۲۳, ۲۰۰۷.

[۸] J. Hausleiter et al., "Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography," Jama, vol. ۳۰۱, no. ۵, pp. ۵۰۰–۵۰۷, ۲۰۰۹.

[۹] R. Smith-Bindman et al., "Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer," Archives of internal medicine, vol. ۱۶۹, no. ۲۲, pp. ۲۰۷۸–۲۰۸۶, ۲۰۰۹.

[۱۰] K. P. Kim, A. J. Einstein, and A. B. De González, "Coronary artery calcification screening: estimated radiation dose and cancer risk," Archives of internal medicine, vol. ۱۶۹, no. ۱۳, pp. ۱۱۸۸–۱۱۹۴, ۲۰۰۹.

[۱۱] Birkfellner W. Applied medical image processing: a basic course. CRC Press; ۲۰۲۴ Sep ۲۴.

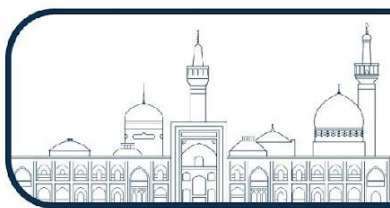
[۱۲] Egdell RG, Bruton E. Henry Moseley, X-ray spectroscopy and the periodic table. Philosophical Transactions of the Royal Society A. ۲۰۲۰ Sep ۱۸;۳۷۸(۲۱۸۰):۲۰۱۹۰۳۰۲.

[۱۳] Harrison RL. Introduction to monte carlo simulation. In AIP conference proceedings ۲۰۱۰ Jan ۵ (Vol. ۱۲۰۴, p. ۱۷).

[۱۴] Böhlen TT, Cerutti F, Chin MP, Fassò A, Ferrari A, Ortega PG, Mairani A, Sala PR, Smirnov G, Vlachoudis V. The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. Nuclear data sheets. ۲۰۱۴ Jun ۱;۱۲۰:۲۱۱–۴

[۱۵] A. Fasso et al., "The physics models of FLUKA: status and recent development," arXiv preprint hep-ph/۰۳۰۶۲۶۷, ۲۰۰۳.

[۱۶] A. Ferrari, J. Ranft, P. R. Sala, and A. Fassò, FLUKA: A multi-particle transport code (Program version ۲۰۰۵) (no. CERN-۲۰۰۵-۱۰). Cern, ۲۰۰۵.



طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آشکارساز گازی به کمک پرینتر سه بعدی (کد مقاله: ۱۲۶۳)

محمد مهدی ابراهیمی بشلی^۱ - حمید مراد^۲ - محمد جواد خداشناس^۱ - حسین آفریده^۳ - علی نگارستانی^۱ - سید مهدی هاشمی^۱

۱. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، علوم و فناوری های نوین، مهندسی هسته ای
۲. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، مهندسی برق و کامپیوتر، مهندسی قدرت و کنترل
۳. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، فیزیک و مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای از موضوعات کلیدی در علوم و فناوری‌های هسته‌ای است. در این پژوهش، یک آشکارساز گازی با هندسه خاص طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. طراحی سه‌بعدی آشکارساز با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز انجام شده و تحلیل میدان الکتریکی با نرم‌افزار کامسول صورت پذیرفته است. عملکرد آشکارساز در مد ستون نوری خودفروشان، با اعمال اختلاف پتانسیل و استفاده از چشمه رادیواکتیو آمرسیوم-۲۴۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ستون نوری خودفروشان در محل قرارگیری چشمه به‌وضوح مشاهده می‌شود. این پژوهش نشان‌دهنده قابلیت طراحی و ساخت آشکارسازهای گازی نوآورانه برای ارزیابی عملکرد هندسه‌های جدید است.

کلمات کلیدی: آشکارساز گازی، ستون نوری خودفروشان، شبیه‌سازی کامسول، آمرسیوم-۲۴۱

Design, simulate, and manufacture a gaseous detector using 3D printers

Mohammad Mahdi Ebrahimi Besheli^{۱*} - Hamid Morad^۲ - Mohammad Javad Khodashenas^۱ - Hossein Afarideh^۳ - Ali Negarestani^۱ - Seyed Mahdi Hashemi^۱

۱. University of Advanced Industrial and Technology, New Sciences and Technologies, Nuclear Engineering

۲. University of Advanced Industrial and Technology, Electrical and Computer Engineering, Power and Control Engineering

۳. Amirkabir University of Technology, Physics and Energy Engineering, Department of Nuclear Engineering

Abstract:

Nuclear radiation detection is a key topic in nuclear science and technology. In this study, a gaseous detector with a specific geometry was designed, simulated, and fabricated. The 3D design of the detector was performed using SolidWorks software, and the electric field analysis was performed using Comsol software. The detector's performance in the self-quenching streamer column mode was evaluated by applying a potential difference and using a radioactive americium-241 source. The results showed that the self-quenching streamer column is observed at the source location. This study demonstrates the capability of designing and fabricating innovative gas detectors to evaluate the performance of new geometries.



Key words: Gaseous detector, the self-quenching streamer column, COMSOL simulation, Americium-²⁴¹

۱- مقدمه:

آشکارسازی و دزیمری تابش‌های هسته‌ای یکی از مباحث مهم در علوم و فنون هسته‌ای است. از انواع آشکارسازهای تابش می‌توان به آشکارساز گازی، نیمه‌هادی و سوسوزن‌ها اشاره کرد که هر یک از موارد بسته به کاربرد و شرایطی که قرار است مورد سنجش قرار بگیرد، استفاده می‌شود [۱].

امروزه با ظهور فناوری‌های نوین، سهولت در ساخت قطعات به کمک پرینتر سه‌بعدی گسترش یافته است [۲-۳]. یان^{۷۲} و همکارانش نیز در پژوهشی کاربرد پرینتر سه‌بعدی در مباحث پزشکی را مورد بررسی قرار دادند [۴]. در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است که با استفاده از فیلامنت‌های رسانا می‌توان توسط پرینتر سه‌بعدی، مدارات الکترونیکی، قطعات و سنسورهای الکترونیکی را با شکل و طراحی منحصر بفردی تولید کرد که استفاده از این تکنولوژی علاوه بر مقرون به صرفه بودن، درجه آزادی بالایی را برای کاربر به منظور طراحی و ساخت قطعات فراهم می‌کند [۴-۹].

استفاده از طراحی و ساخت به کمک پرینترهای سه‌بعدی در زمینه ساخت و تولید آشکارسازهای هسته‌ای نیز رو به افزایش است. بریویو^{۷۳} و همکارانش در پژوهشی استفاده از این پرینترها را برای ساخت محفظه یونیزاسیون مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش بیانگر متناسب بودن پاسخ آشکارساز در نمونه ساخته‌شده با پرینتر با نمونه تجاری دستگاه است با این تفاوت که از نظر هزینه می‌توان صرفه‌جویی نمود [۱۰]. برون‌بائر^{۷۴} و همکارانش نیز استفاده از این فناوری را برای ساخت آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم^{۷۵} و صفحه خوانش آشکارساز گازی ریزالگو استفاده کردند و نتیجه گرفتند با توجه به قیمت مناسب و سرعت بالای طراحی می‌توان از این تکنولوژی در ساخت نمونه‌های اولیه و آزمایشی استفاده نمود [۱۱]. نتایج سایر پژوهش‌ها نیز بیانگر پاسخ خطی مناسب آشکارسازهای ساخته شده توسط این روش و همچنین مقرون به صرفه بودن آن دارد [۱۲-۱۳].

برای شروع کار با پرینترهای سه‌بعدی، یک طراحی دقیق مورد نیاز است. نرم‌افزارهای زیادی برای طراحی سه‌بعدی قطعات وجود دارد که از این میان استفاده از سالیدورکز^{۷۶} بدلیل رابط کاربری آسان، دقت و سرعت بالا و همچنین کتابخانه‌های مناسب مورد رغبت قرار گرفته است [۱۴].

قبل از انجام آزمایشات تجربی و همچنین ساخت سیستم‌های آشکارسازی لازم است پارامترهای فیزیکی آن مورد تحلیل قرار گرفته و بهینه‌سازی^{۷۷} روی آن انجام گیرد. یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه تجزیه و تحلیل الکترواستاتیک، کامسول^{۷۸} است که معادلات را به روش المان محدود مورد تحلیل و بررسی قرار داده و دارای محیط کاربری بصری زیبا و توانایی بالا در حل مسائل و معادلات فیزیکی پیشرفته است [۱۵].

^{۷۲} Yan

^{۷۳} Brivio

^{۷۴} Brunbauer

^{۷۵} Thick Gas Electron Multiplier

^{۷۶} SOLIDWORKS

^{۷۷} Optimization

^{۷۸} COMSOL Multiphysics

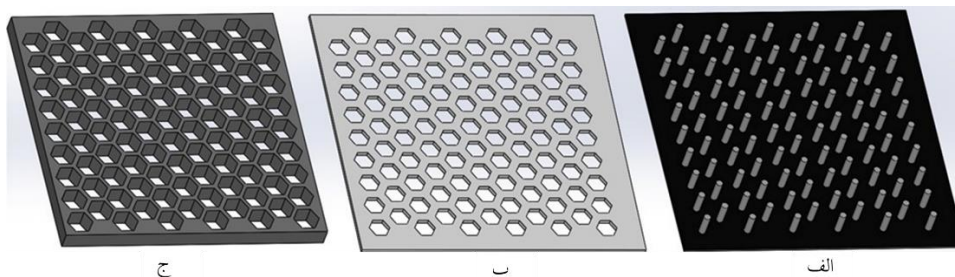


یکی از مدهای عملکردی آشکارسازها مد ستون نوری خود فرو نشان^{۷۹} است. بررسی مد ستون نوری خود فرو نشان و طراحی آشکارساز با این مد عملیاتی برای آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی در کشور خودمان به طور گسترده توسط نگارستانی و همکاران مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است [۱۶-۱۸].

در پژوهش حاضر، هندسه خاصی از آشکارساز گازی توسط نرم افزار سالی دورکز طراحی گردید و سپس تحلیل الکترواستاتیک و میدان های الکتریکی آن به کمک کامسول انجام گرفت و در انتها، عملکرد آشکارساز جدید در مد ستون نوری خود فرو نشان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

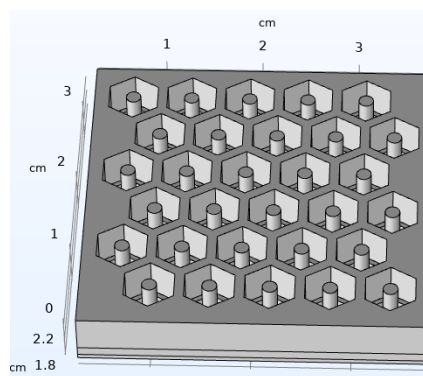
۲- روش کار:

در مرحله ابتدایی طراحی سه بعدی آشکارساز به کمک نرم افزار سالی دورکز انجام می گیرد. **Error! Reference source not found.** شماتیک صفحات آشکارساز را در سالی دورکز نمایش می دهد.



شکل ۲- طراحی انجام شده در محیط سالی دورکز (الف) آند (ب) صفحه عایق (ج) کاتد

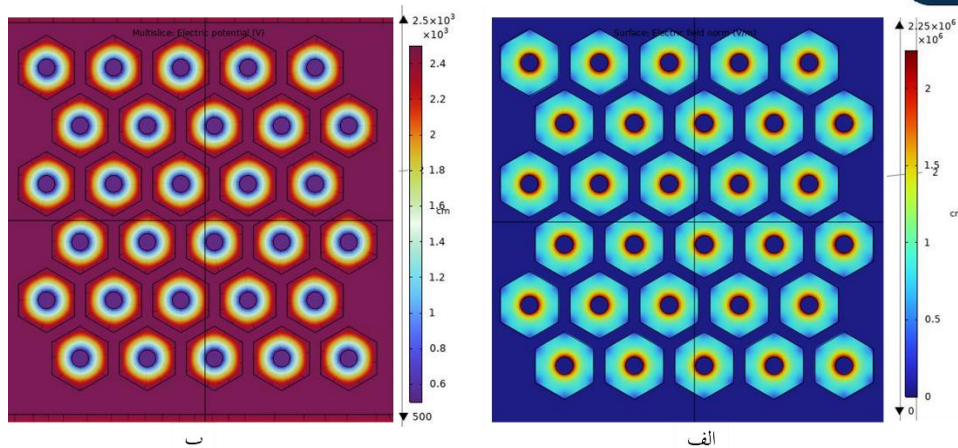
سپس به منظور سهولت در پردازش و تسریع محاسبات مربوط به میدان الکتریکی بخشی از هندسه طراحی شده وارد نرم افزار کامسول شده و پس از مش بندی مناسب برای حل مسئله، شرایط مرزی مناسب اتخاذ می گردد. در شکل ۳ بخشی از آشکارساز سرهم شده در محیط کامسول نموده شده است.



شکل ۳- بخشی از هندسه طراحی شده در محیط کامسول

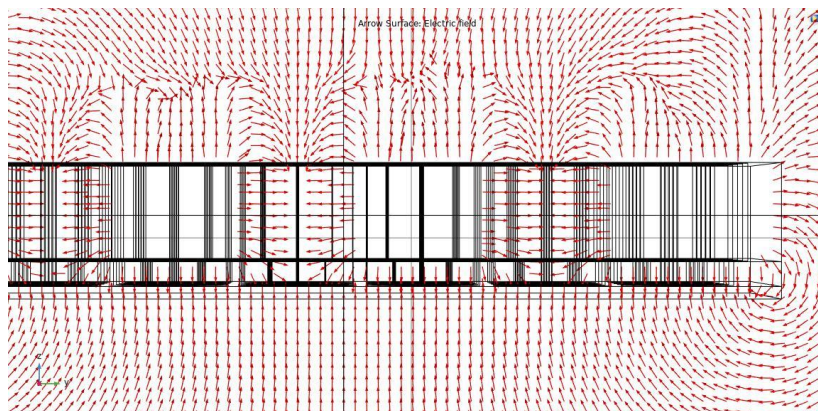
پس از مش بندی مناسب، به ازای اختلاف پتانسیل ۲۵۰۰ ولت بین کاتد و آند، میدان الکتریکی بین صفحات مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۴ شدت میدان و پتانسیل الکتریکی بین صفحات را نمایش می دهد.

^{۷۹} Self-Quenching Streamer Mode (SQS)



شکل ۴- الف) شدت میدان الکتریکی (ب) پتانسیل الکتریکی بین صفحات

همانطور که در شکل ۴ مشخص است، در نواحی اطراف ستون‌های کاتد، میدان الکتریکی قوی‌تر است. خطوط میدان الکتریکی نیز در شکل ۵ به تصویر درآمده‌است.



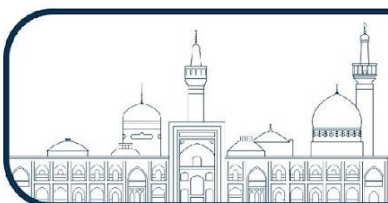
شکل ۵- خطوط میدان الکتریکی در نواحی مختلف

در مرحله بعدی آشکارساز طراحی شده توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شده و قطعات در کنار یکدیگر قرار می‌گیرد. توجه به این نکته ضروریست که در ساخت صفحه عایق از فیلامنت معمولی و در ساخت صفحات آند و کاتد از فیلامنت‌های مخصوص که رسانایی الکتریکی خوبی دارند استفاده شده است. در شکل ۶ فیلامنت‌های عایق و رسانا به نمایش درآمده است.

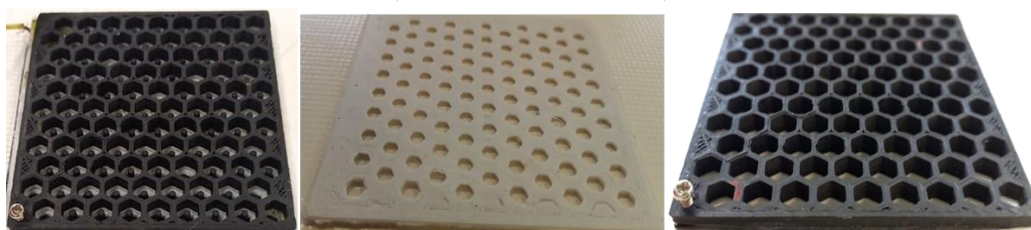


شکل ۶- فیلامنت‌های الف) رسانا ب) عایق

پرینتر سه‌بعدی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۷ به نمایش درآمده است. شکل ۸ اجزای آشکارساز را بطور جداگانه و پس از سرهم کردن نمایش می‌دهد.

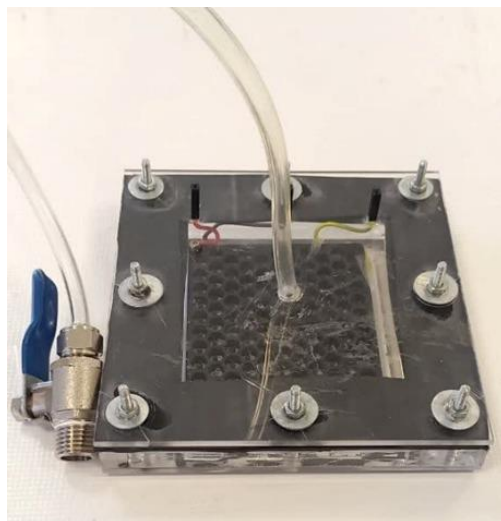


شکل ۷- پرینتر مورد استفاده در این پژوهش



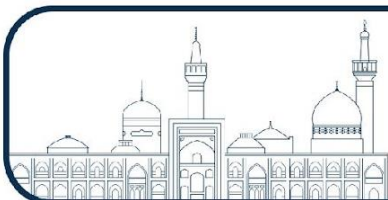
شکل ۸- اجزای آشکارساز ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی (الف) کاتد (ب) عایق بین صفحات (ج) کل صفحات سرهم شده

سپس آشکارساز ساخته شده درون محفظه‌ی مناسب قرار گرفته و اتصالات الکترونیکی و کپسول گاز P^{10} در محل‌های مخصوص خود نصب می‌شوند. شکل ۹ نمایانگر آشکارساز و اتصالات مربوط به آن است.



شکل ۹- آشکارساز و اجزای آن در آزمایش تجربی

با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی مناسب بین صفحات که از نتایج حاصل از شبیه‌سازی استخراج گردید، و قرار دادن چشمه رادیو اکتیو آمرسیوم-۲۴۱ در محفظه‌ی آشکارساز، عملکرد سیستم در مد ستون نوری خود فرو نشان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ پاسخ آشکارساز را نسبت به چشمه در مد ستون نوری خود فرو نشان نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰- عملکرد سیستم در مد ستون نوری خودفروشان

۳- نتایج:

همانطور که در شکل ۴ مشخص است، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی ستون‌های کاتد بیشینه بوده و منجر به افزایش تکثیر ذرات باردار درون آشکارساز می‌گردد. همچنین نتایج شکل ۵ حاکی از آن است که جهت خطوط میدان الکتریکی ایجاد شده به نحویست که الکترون‌ها و ذرات باردار ایجاد شده را به سمت آند سوق داده و با افزایش سرعت و انرژی آن‌ها موجب تکثیر و در نتیجه افزایش بهره آشکارسازی می‌گردد. باتوجه به شکل ۱۰ می‌توان دریافت هندسه‌ی طراحی شده در این پژوهش برای آشکارسازی تابش موثر بوده و می‌تواند گام مهمی در توسعه آزمایشات و طراحی‌های جدید در زمینه آشکارسازی ذرات بردارد.

۴- بحث و نتیجه گیری:

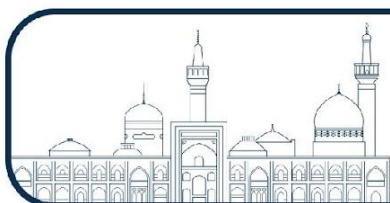
باتوجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان طراحی آشکارسازها با هندسه‌های پیچیده و غیرمعمول به کمک پرینتر سه بعدی و انجام آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی به منظور صحت‌سنجی و بررسی عملکرد آن‌ها می‌تواند گام بلندی در زمینه توسعه دانش نظری و تجربی در آشکارسازی ذرات برداشته و علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه، با در اختیار قرار دادن دانش فنی مربوط به آن، طراحی آشکارسازها متناظر با کاربرد و شرایط مورد استفاده را تسهیل نموده و محدودیت‌های فعلی از قبیل هندسه‌های مرسوم که عموماً بصورت استوانه‌ای و یا صفحه‌ای خاص است را از میان بردارد.

۵- مراجع:

- [۱] Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, ۲۰۱۰.
- [۲] Shahrubudin, Nurhalida, Te Chuan Lee, and R. J. P. M. Ramlan. "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications." Procedia manufacturing ۳۵ (۲۰۱۹): ۱۲۸۶-۱۲۹۶.
- [۳] Ramya, A., and Sai Leela Vanapalli. "3D printing technologies in various applications." International Journal of Mechanical Engineering and Technology ۷,۳ (۲۰۱۶): ۳۹۶-۴۰۹.
- [۴] Yan, Qian, et al. "A review of 3D printing technology for medical applications." Engineering ۴,۵ (۲۰۱۸): ۷۲۹-۷۴۲.



- [۵] Kwok, Sen Wai, et al. "Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors." *Applied Materials Today* ۹ (۲۰۱۷): ۱۶۷-۱۷۵.
- [۶] Flowers, Patrick F., et al. "3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament." *Additive Manufacturing* ۱۸ (۲۰۱۷): ۱۵۶-۱۶۳.
- [۷] Lazarus, Nathan, and Harvey H. Tsang. "3-D printing structural electronics with conductive filaments." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* ۱۰,۱۲ (۲۰۲۰): ۱۹۶۵-۱۹۷۲.
- [۸] Tan, Hong Wei, et al. "3D printed electronics: Processes, materials and future trends." *Progress in Materials Science* ۱۲۷ (۲۰۲۲): ۱۰۰۹۴۵.
- [۹] Goh, Guo Liang, et al. "3D printing of multilayered and multimaterial electronics: A review." *Advanced Electronic Materials* ۷,۱۰ (۲۰۲۱): ۲۱۰۰۴۴۵.
- [۱۰] Brivio, D., et al. "3D Printing for Rapid Prototyping of Ionization Chamber Arrays." *MEDICAL PHYSICS*. Vol. ۴۶. No. ۶. ۱۱۱ RIVER ST, HOBOKEN ۰۷۰۳۰-۵۷۷۴, NJ USA: WILEY, ۲۰۱۹.
- [۱۱] Brunbauer, F. M., et al. "3D printing of gaseous radiation detectors." *Journal of Instrumentation* ۱۴,۱۲ (۲۰۱۹): P۱۲۰۰۵.
- [۱۲] Albert, Steffen, et al. "Towards customizable thin-panel low-Z detector arrays: electrode design for increased spatial resolution ion chamber arrays." *Physics in Medicine & Biology* ۶۵,۸ (۲۰۲۰): ۰۸NT۰۲.
- [۱۳] Fargher, Sam, Chris Steer, and Lee Thompson. "The use of 3D printing in the development of gaseous radiation detectors." *EPJ Web of Conferences*. Vol. ۱۷۰. EDP Sciences, ۲۰۱۸.
- [۱۴] Tran, Paul. *SOLIDWORKS ۲۰۲۴ Basic Tools: Getting Started with Parts, Assemblies and Drawings*. SDC Publications, ۲۰۲۴.
- [۱۵] Pryor, Roger W. *Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach*. Jones & Bartlett Publishers, ۲۰۰۹.
- [۱۶] Arsia, R., et al., A new approach to measure radon by Thick Gas Electron Multiplier. *Radiation Physics and Chemistry*, ۲۰۲۲. ۱۹۶: p. ۱۱۰۱۱۴.
- [۱۷] Hashemi, S.M. and A. Negarestani, A new method for alpha particle detection use of Electron multiplier assembly (EMA) in SQS mode. *Journal of Instrumentation*, ۲۰۱۸. ۱۳(۰۵): p. P۰۵۰۲۵.
- [۱۸] Sour, R., A. Negarestani, and M. Mahani, A new approach for direct imaging of Alpha radiation by using Micro Pattern Gas Detectors in SQS mode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, ۲۰۱۸. ۸۸۴: p. ۱۲۸-۱۳۵.



مدل سازی فرآیند ساخت چشمه استاندارد کبالت-۶۰ با استفاده از روش الکترونشانی مبتنی

بر آند مارپیچی در حضور میدان مغناطیسی خارجی (کد مقاله : ۱۲۶۹)

فتحی نژاد، میثم^۱-شکور، حمیدرضا^۱-نجفی، مصطفی^۲-حسین زاده، طاهر^۱

۱. مرکز علم و فناوری فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

۲. مرکز علم و فناوری شیمی، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

چکیده:

در این پژوهش، فرآیند الکترونشانی برای تولید چشمه استاندارد کبالت-۶۰ در حضور میدان مغناطیسی خارجی و با به کارگیری آند مارپیچی شبیه سازی شد. این شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول انجام گرفت تا اثرات میدان مغناطیسی بر فرآیند رسوبدهی مورد بررسی قرار گیرد. فرآیند الکترونشانی در ولتاژ ۹ ولت، زمان ۴۵ دقیقه و با اعمال میدان مغناطیسی نیم تسلا بر روی بستر فولاد ضد زنگ انجام گرفت. نتایج مدل سازی نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی با ایجاد نیروی لورنتس و اصلاح مسیر حرکت یون ها، موجب افزایش ۶/۲۵ درصدی ضخامت لایه و بهبود چشمگیر یکنواختی سطح از ۹۰ به ۶۰ میکرومتر می شود. همچنین مشخص شد با افزایش رسانندگی الکترولیت از ۰/۰۸۸۴ به ۷۶۸/۱ زیمنس بر متر، به دلیل افزایش چگالی جریان، ضخامت لایه رسوبی افزایش می یابد. هندسه مارپیچی آند با ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت تر در اطراف کاتد، به بهبود کیفیت و یکنواختی لایه کمک می کند. در این مطالعه، مدل شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول به عنوان روشی مؤثر و قدرتمند برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند تولید چشمه های استاندارد رادیواکتیو و کاهش هزینه های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت.

کلمات کلیدی: چشمه استاندارد، الکترونشانی مگنتوهیدرودینامیک، آند مارپیچی، کامسول

Modeling the Process of Fabricating a Standard Cobalt-^{۶۰} Source Using the Electrodeposition Method Based on a Helical Anode in the Presence of an External Magnetic Field

Fathinejad, Meisam^{۱*}, Shakur, Hamid Reza^۱, Najafi, Mostafa^۲, Hossienzade, Taher^۱

۱. science and technology center of physics, Imam Hossein comprehensive university, Tehran, Iran

۲. science and technology center of Chemistry, Imam Hossein comprehensive university, Tehran, Iran

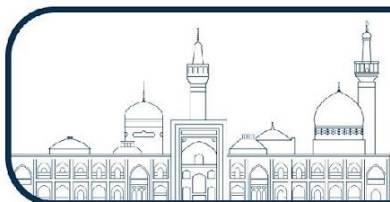
Abstract:

In this study, the electrodeposition process for the fabrication of a standard cobalt-^{۶۰} source was simulated in the presence of an external magnetic field using a helical anode. The simulation was conducted utilizing COMSOL Multiphysics to investigate the effects of the magnetic field on the deposition process. The electrodeposition was performed at a voltage of ۹ V, for a duration of ۴۵ minutes, and under the application of a ۰,۵ Tesla magnetic field on a



stainless steel substrate. The simulation results demonstrated that the application of a magnetic field, by inducing the Lorentz force and modifying the ion trajectories, led to a ۶,۲۵% increase in layer thickness and a significant improvement in surface uniformity, reducing roughness from ۹۰ to ۶۰ micrometers. Additionally, it was observed that increasing the electrolyte conductivity from ۰,۰۸۸۴ to ۱,۷۶۸ S/m resulted in an increase in the deposited layer thickness, attributed to the enhancement of current density. The helical geometry of the anode contributed to a more uniform electric field distribution around the cathode, thereby improving the quality and uniformity of the deposited layer. In this study, the COMSOL-based simulation model was employed as an effective and powerful approach for optimizing the process parameters in the fabrication of standard radioactive sources, while also contributing to the reduction of laboratory costs.

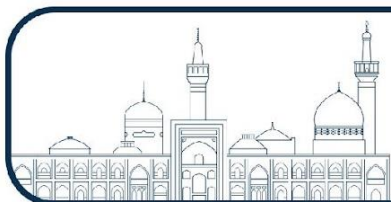
Key words: Standard source, Magnetohydrodynamic Electrodeposition, Helical anode, COMSO



۱ - مقدمه:

استفاده از ^{60}Co به عنوان یک چشمه استاندارد پرتوزا در کاربردهای پزشکی، صنعتی و پژوهشی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در تحقیقات علمی، چشمه‌های استاندارد رادیواکتیو نقش حیاتی در کالیبراسیون تجهیزات پرتوسنجی، اعتبارسنجی روش‌های اندازه‌گیری و تحقیقات هسته‌ای ایفا می‌کنند [۱]. کبالت-۶۰ به عنوان یکی از رایج‌ترین چشمه‌های رادیواکتیو مورد استفاده در این زمینه، پرتوهای گاما با انرژی‌های ۱/۱۷ و ^{60}Co ۳۳/۱ MeV تولید می‌کند که برای کالیبراسیون طیف‌سنجی گاما بسیار مناسب است [۲-۳]. روش‌های مختلفی برای تولید چشمه‌های استاندارد وجود دارد که روش الکترونشانی به دلیل قابلیت کنترل شرایط فرآیند رسوب‌دهی، به عنوان یکی از روش‌های مرسوم برای تولید چشمه‌های استاندارد شناخته می‌شود [۴]. این روش امکان تولید لایه‌های نازک چشمه‌های رادیواکتیو و کنترل دقیق ضخامت را فراهم می‌کند. پارامترهای مختلفی مانند ترکیب الکترولیت، هندسه آند و دیگر پارامترهای مؤثر من جمله pH الکترولیت، کنترل دما و زمان رسوب می‌توانند بر کیفیت و خصوصیات لایه تولیدی تأثیرگذار باشند. بررسی و شبیه‌سازی این عوامل می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند ساخت چشمه‌های استاندارد پرتوزا کمک شایانی نماید و از بروز مشکلاتی نظیر ناهمگنی در توزیع رسوب لایه‌ها جلوگیری کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رسانندگی الکترولیت نقش مهمی در فرآیند الکترونشانی ایفا می‌کند و می‌تواند بر یکنواختی توزیع رادیونوکلئیدها در سطح زیرلایه تأثیر قابل توجهی داشته باشد [۵-۶]. همچنین هندسه آند، توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد که منجر به تغییرات قابل توجه در ضخامت و کیفیت لایه نهایی می‌شود [۷]. در برخی موارد، افزایش انتقال جرمی یون‌ها در سلول الکترونشانی مطلوب است. این امر با اعمال میدان مغناطیسی به سلول قابل دستیابی است. اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر یون‌های متحرک در محلول الکترولیت، نیروی لورنتس ایجاد کرده و منجر به حرکت دایروی آن‌ها می‌گردد. این پدیده، به عنوان اثر مگنتوهیدرودینامیک^{۸۰} شناخته می‌شود. [۸] نشان داده شده است که هنگامی که میدان‌های مغناطیسی حدود ۱ تسلا بر روی الکترولیت‌های آبی اعمال شود، تقریباً ۱۰۰٪ انتقال جرم الکتروشیمیایی، افزایش می‌یابد. انتقال جرم سریع‌تر می‌تواند منجر به افزایش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی و در نتیجه افزایش کارایی فرآیندهای الکتروشیمیایی شود. [۹] همچنین اعمال میدان مغناطیسی بر مورفولوژی رسوب نیز تأثیر می‌گذارد. هنگامی که سیال موجود در سلول الکترونشانی در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر حامل‌های بار الکتریکی موجود در آن (مانند الکترون‌ها و یون‌ها) نیرویی به نام نیروی لورنتس اعمال می‌شود. جهت و بزرگی این نیرو به بار الکتریکی، سرعت حامل بار و شدت میدان مغناطیسی بستگی دارد [۱۰]. انواع مختلفی از چشمه‌های رادیواکتیو با شکل‌ها، اندازه‌ها و سطوح فعالیت رادیواکتیو گوناگون در کاربردهای مهم بسیاری از حوزه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صنعت، از این چشمه‌ها برای اندازه‌گیری نرخ جریان، تشخیص نشتی، رادیوگرافی برای بررسی ترک‌ها در لوله‌های فولادی، دستگاه‌های سنجش ضخامت مایعات و جامدات، ارزیابی منابع معدنی و پرتودهی مواد غذایی به کار می‌روند [۱۱-۱۲]. در پزشکی، این چشمه‌ها معمولاً در تله‌تراپی و براکی‌تراپی برای درمان بیماری‌های بدخیم، اندازه‌گیری چگالی استخوان، درمان سرطان چشم و پروستات و موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. همچنین، تشخیص غیرمخرب میراث فرهنگی از طریق چشمه‌های آلفای رادیواکتیو با استفاده از دستگاهی موسوم به PIXE (انتشار اشعه ایکس ناشی از ذرات) امکان‌پذیر است [۱۴]. برخی از چشمه‌های شناخته‌شده که با استفاده از روش الکترونشانی تولید شده‌اند، شامل ایزوتوپ‌های ایزوتوپ‌های ^{60}Co ، ^{63}Ni ، ^{65}Zn ، ^{90}Sr ، ^{241}Am می‌باشند [۱۲-۱۴-۱۵-۱۶].

^{۸۰} Magnetohydrodynamic



میزان فعالیت رادیواکتیو این چشمه‌ها از مرتبه میکروکوری برای اهداف کالیراسیون تا چند هزار کوری در پرتودهنده‌های صنعتی و پرتودرمانی متغیر است. هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای رسانندگی الکترولیت و اعمال میدان مغناطیسی بر فرآیند الکترونشانی ^{60}Co و تعیین شرایط بهینه برای تولید چشمه‌های استاندارد با کیفیت بالا است. بدین منظور، ابتدا معادلات دیفرانسیل حاکم بر فرآیند رسوب‌دهی کبالت در مازول الکترونشانی نرم افزار کامسول پیاده سازی شد و سپس از مدل سه بعدی فرآیند وابسته به زمان برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب‌دهی کبالت با روش الکترونشانی انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای بهینه‌سازی انواع روش‌های تولید چشمه‌های رادیواکتیو با بازدهی رسوب بالا و کنترل یکنواختی لایه‌های رسوب‌دهی شده باشد.

۲- تئوری:

در این پژوهش توسعه یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی ۳D فرآیند الکترونشانی در حضور میدان مغناطیسی خارجی جهت ساخت یک چشمه استاندارد ^{60}Co مورد مطالعه قرار گرفت. نرم افزار کامسول یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند در یک محیط شبیه‌سازی گرافیکی معادلات دیفرانسیل را به روش اجزای محدود حل نماید.

مفروضات زیر برای توسعه مدل ریاضی در نظر گرفته شد:

(۱) نظریه محلول رقیق اعمال شد، این نظریه بیان می‌کند که برهمکنش‌های ناچیزی بین گونه‌های محلول وجود دارد. (۲) پارامترهای فیزیکی انتقال و جنبشی در سراسر محلول ثابت هستند. (۳) محلول هم‌دماست.

(۴) هیچ واکنش شیمیایی همگنی در الکترولیت رخ نمی‌دهد.

چگالی جریان توسط معادله بوتلر-ولمر که یکی از اساسی‌ترین روابط در الکتروشیمی است، بیان می‌شود. این رابطه ارتباط بین جریان در سطح مشترک الکتروود-الکترولیت در اثر واکنش الکتروود با پتانسیل اضافی (η) را نشان می‌دهد [۱۷].

$$i = i_0 \left[\exp \exp \left(-\frac{\alpha F \eta}{RT} \right) - \exp \exp \left(\frac{(1-\alpha) F \eta}{RT} \right) \right] \quad (1)$$

معادله انتقال جرم که بر اساس شار گونه‌های یونی در محلول بیان می‌شود و به معادله نرنست-پلانک مشهور است، توسط رابطه زیر بیان می‌شود.

$$N_i = -Z_i U_i F C_i \nabla \phi_L - D_i \nabla C_i + V_i C_i \quad (2)$$

که در معادله بیان شده: N_i شارذرات، Z_i بارذرات، U_i تحرک پذیری، F ثابت فارادی، C_i غلظت، D_i ضریب پخش، ϕ_L پتانسیل الکتریکی، V_i سرعت ذرات می‌باشد [۱۸]. هرگاه میدان الکتریکی در داخل یک سلول الکترونشانی اعمال شود حامل‌های بار که مثبت هستند با سرعت سوق V در جهت میدان الکتریکی به سطح کاتد می‌رسند، بنابراین می‌توان چگالی جریان و سرعت حرکت حامل‌های بار را بدین صورت نیز بدست آورد.



$$J = \frac{I}{A} = \frac{Ne}{AT} = \frac{NeL}{ATL} = \frac{N}{AL} \times \frac{L}{T} \times e = neV \quad (3)$$

جهت J در همان جهت سرعت حرکت بارهاست و اگر بارها منفی باشند، در خلاف جهت آنهاست. و همچنین در این رابطه ne چگالی حامل‌های بار است. نیروی لورنتس باعث حرکت مارپیچی بارهای متحرک می‌شود بنابراین القای جریان همرفت در الکترولیت، انتقال جرم و توزیع یون را بهبود می‌بخشد [۱۹]. از این رو نیروی لورنتس وارد بر ذرات باردار از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$F_L = J \times B = q (E + V \times B) \quad (4)$$

از آنجایی که جهت چگالی جریان J در همان جهت سرعت حرکت بارهاست بنابراین قانون تعمیم یافته اهم در محیط‌های مگنتوهیدرودینامیک به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

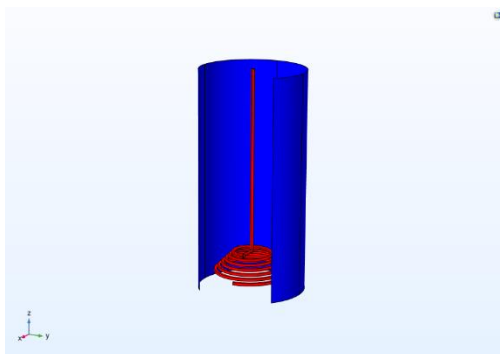
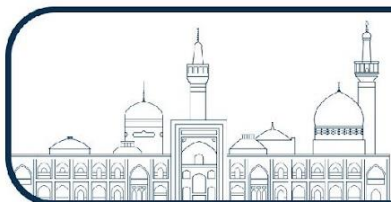
$$J = \sigma (E + V \times B) \quad (5)$$

با استفاده از قانون تعمیم یافته اهم، می‌توان چگالی جریان القاء شده توسط میدان مغناطیسی و همچنین رسانندگی الکترولیت را در یک سلول الکتروشانی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته است محاسبه کرد. در رابطه مطرح شده، σ نشان‌دهنده رسانندگی الکترولیت است.

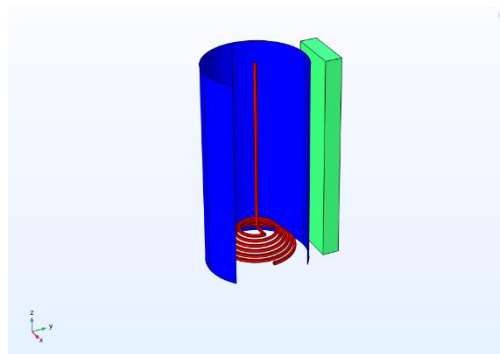
۲-۱- اجرا و شبیه‌سازی کامپیوتری در نرم افزار کامسول

برای شبیه‌سازی فرآیند ساخت چشمه ^{60}Co به روش الکتروشانی، الکترولیتی حاوی کبالت-آمین-اکسالات با غلظت ۱ ppm کبالت غیرفعال به محلول آبی آمونیاک ۲/۴ مولار افزوده شد. سپس، با اضافه کردن نشانگر ^{60}Co با فعالیتی در محدوده ۱۰۰ تا ۲۵۰ بکرل، حجم نهایی الکترولیت به 5cm^3 رسانده شد. این فرآیند بر روی بستری از جنس فولاد ضدزنگ (گرید ۳۰۴) با ضخامت ۱ mm انجام گرفت. به منظور لحاظ نمودن مقادیر بهینه پارامترهای فرآیند الکتروشانی جهت تولید چشمه استاندارد کبالت، مقادیر مطابق نتایج مقاله ارائه شده توسط آقای ساو و همکاران در نظر گرفته شد. [20] در این فرآیند شبیه‌سازی ۳D، هندسه آند مارپیچی از جنس پلاتین با قطر ۱۲/۱ میلی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد. هدف از به کارگیری این هندسه، توزیع یکنواخت میدان الکتریکی در فرآیند مدل‌سازی سه‌بعدی بود. و فاصله بین آند تا کاتد 5cm تعیین شد. فرآیند الکتروشانی در ولتاژ ثابت ۹ ولت و مدت زمان ۴۵ دقیقه و در سطح تماس 2cm^2 شبیه‌سازی شد. معادلات نرنست-پلانک و بوتلر-ولمر برای توصیف انتقال جرم و چگالی جریان استفاده شدند. به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی عمود بر سطح کاتد و یکنواختی ضخامت لایه رسوب داده شده، یک آهنربای نئودیمیومی با شدت نیم تسلا در کنار سلول الکتروشانی قرار داده شد که نمایی از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

^{۸۱} tracer



الف

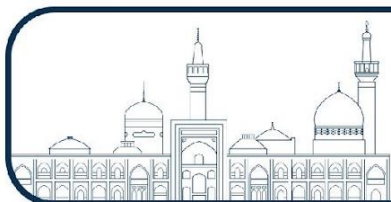


ب

شکل (۱): نمایی از نمایش سه‌بعدی شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول. (الف) فرآیند الکترون‌نشانی. (ب) فرآیند الکترون‌نشانی در حضور میدان مغناطیسی خارجی با استفاده از یک آند پلاتینی ماریپیچی (میله قرمز)، به همراه آهنربا (بلوک مستطیلی سبز) نئودیمیومی که در کنار سلول الکترون‌نشانی با بدنه ای از جنس تفلون (آبی) و کاتدی از جنس فولاد ضد زنگ که در کف استوانه قرار گرفته است.

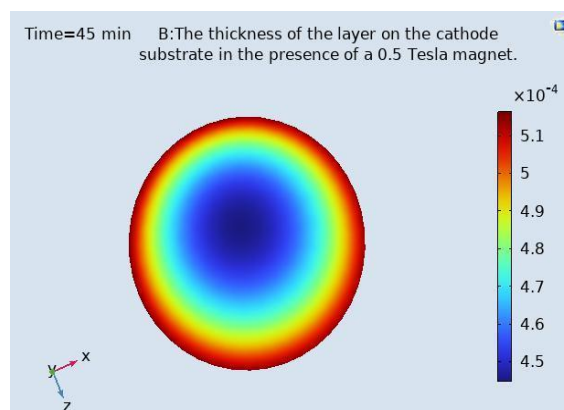
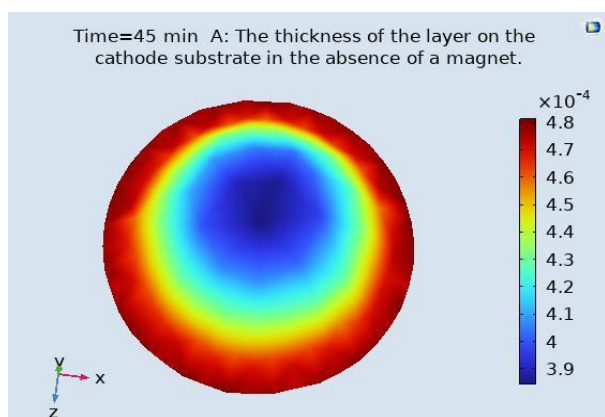
۳- نتایج:

در این پژوهش، تأثیر رسانندگی الکترولیت بر ضخامت لایه‌ی رسوبی در دو فرآیند الکترون‌نشانی معمولی و الکترون‌نشانی در حضور میدان مغناطیسی خارجی با آند ماریپیچی مورد مطالعه قرار گرفت. مراحل شبیه‌سازی با مقادیر مختلف رسانندگی الکترولیت شامل $\frac{S}{m} \times 10^{-4}$ ، $\frac{S}{m} \times 10^{-3}$ ، $\frac{S}{m} \times 10^{-2}$ ، $\frac{S}{m} \times 10^{-1}$ و $\frac{S}{m} \times 10^0$ انجام شد. رسانندگی الکترولیت یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند الکترون‌نشانی است که مستقیماً بر چگالی جریان و در نتیجه ضخامت لایه رسوبی تأثیر می‌گذارد. در سلول الکترون‌نشانی بدون حضور آهنربا، چگالی جریان توسط قانون اهم ($J = \sigma E$) توصیف می‌شود، در حالی که در سلول الکترون‌نشانی با حضور آهنربا، قانون تعمیم یافته اهم $J = \sigma(E + V \times B)$ حاکم است. نمودارهای ارائه شده، در شکل ۲ ارتباط بین رسانندگی الکترولیت و ضخامت لایه رسوب را در دو شرایط مختلف نشان می‌دهد، با تحلیل این نمودارها، می‌توان به درک عمیق‌تری از تأثیر میدان مغناطیسی بر فرآیند الکترون‌نشانی و همچنین نقش رسانندگی الکترولیت در فرآیند ساخت چشمه‌های استاندارد دست یافت. هر دو نمودار نشان می‌دهد که با افزایش رسانندگی الکترولیت، ضخامت لایه رسوب نیز افزایش می‌یابد. طبق قانون اهم افزایش رسانندگی باعث افزایش جریان عبوری از سلول و در نتیجه منجر به افزایش سرعت رسوب‌دهی می‌شود. در نمودار بدون میدان مغناطیسی، افزایش رسانندگی الکترولیت به طور مستقیم با افزایش ضخامت لایه رسوب همراه است. این رفتار مطابق با قانون اهم است. زیرا با افزایش رسانندگی، مقاومت الکتریکی محلول کاهش یافته و در نتیجه شدت جریان افزایش می‌یابد که منجر به افزایش سرعت رسوب‌دهی می‌شود. در نمودار با حضور میدان مغناطیسی، شیب نمودار نسبت به نمودار بدون میدان مغناطیسی بیشتر است. این نشان می‌دهد که در حضور میدان مغناطیسی، افزایش رسانندگی تأثیر بیشتری بر ضخامت لایه رسوب دارد. دلیل این امر آن است که در حضور میدان مغناطیسی، نیروهای لورنتس باعث افزایش حرکت یون‌ها به سمت کاتد می‌شوند و در نتیجه سرعت رسوب‌دهی بیشتر افزایش می‌یابد. با افزایش رسانندگی الکترولیت، چگالی جریان در هر دو حالت افزایش می‌یابد، اما در سلول الکترون‌نشانی مگنتوهیدرودینامیکی، میزان افزایش به شدت میدان مغناطیسی و سرعت سیال وابسته است. در شرایطی که $V \times B$ هم‌جهت با E است، سلول الکترون‌نشانی مگنتوهیدرودینامیک عملکرد بهتری در افزایش رسوب‌دهی دارد.

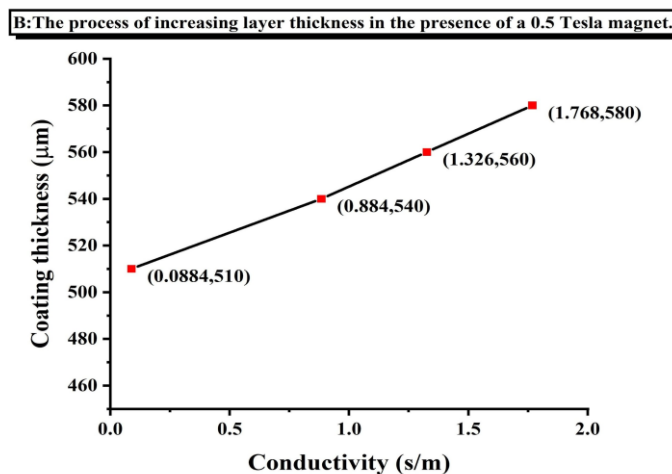
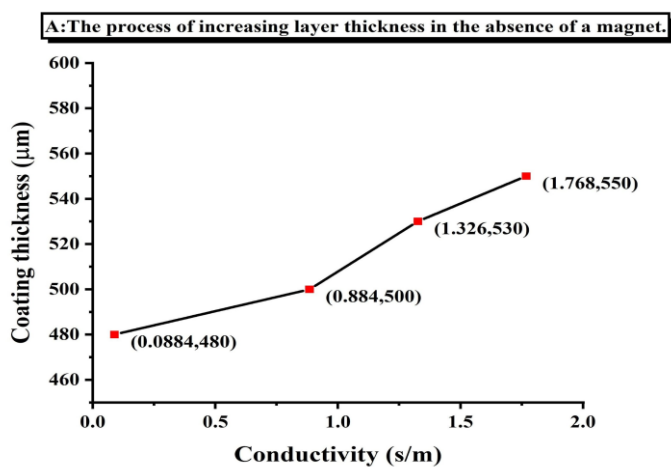


از این رو با افزایش چگالی جریان به طور مستقیم با افزایش سرعت رسوب‌دهی مرتبط است. زیرا هر چه تعداد یون‌هایی که به سطح کاتد می‌رسند بیشتر باشد، سرعت تشکیل رسوب افزایش می‌یابد.

شکل (۲): روند افزایشی ضخامت لایه، روی بستر کاتد همراه با افزایش رسانندگی الکترولیت. الف: در یک سلول الکتروشانی. ب: اعمال یک آهنربای نیم تسلا به سلول الکتروشانی.

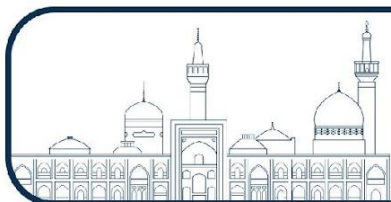


شکل (۲): روند افزایشی ضخامت لایه، روی بستر کاتد همراه با افزایش رسانندگی الکترولیت. الف: در یک سلول الکتروشانی. ب: اعمال یک آهنربای نیم تسلا به سلول الکتروشانی.



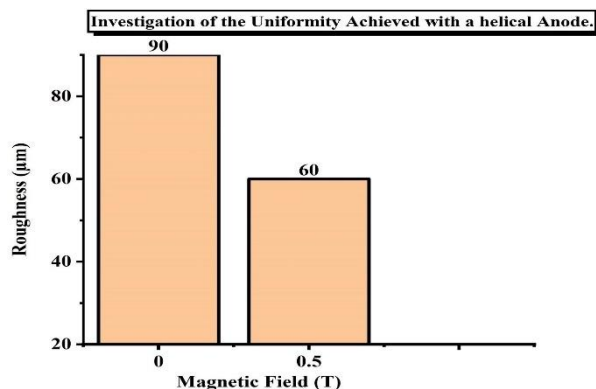
شکل (۳): نمایی از ضخامت لایه رسوب‌دهی شده روی بستر کاتد با استفاده از آند مارپیچی در یک نمونه با رسانندگی الکترولیت 0.884 s/m . الف: در سلول الکتروشانی. ب: اعمال یک آهنربای نیم تسلا به سلول الکتروشانی.

فرآیند الکتروشانی یکی از روش‌های پرکاربرد در رسوب‌دهی لایه‌های نازک بر روی کاتد است که در آن، کنترل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نقش مهمی در دستیابی به ضخامت و یکنواختی لایه مطلوب دارد. شکل ۳ ضخامت لایه رسوب‌داده شده بر سطح کاتد را برای نمونه‌ای با رسانندگی الکترولیت برابر با $0.884 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ ، در شرایط بدون حضور میدان مغناطیسی و با حضور میدان مغناطیسی به مقدار نیم تسلا را نشان می‌دهد. در شرایطی که میدان مغناطیسی حضور ندارد، ضخامت لایه در مرکز کاتد حداقل مقدار $3.9 \times 10^{-4} \text{ m}$ و در لبه‌ها حداکثر مقدار $4.8 \times 10^{-4} \text{ m}$ را دارد. این عدم یکنواختی به دلیل کاهش تراکم

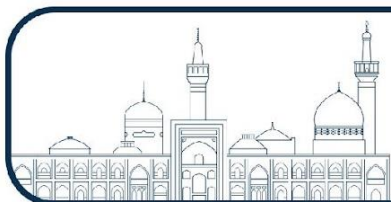


یون‌ها در مرکز کاتد و تمایل آن‌ها به تجمع بیشتر در لبه‌ها رخ می‌دهد. در شرایطی که میدان مغناطیسی حضور ندارد، یون‌ها تنها تحت تأثیر میدان الکتریکی به صورت مستقیم به سمت سطح کاتد حرکت می‌کنند. این حرکت مستقیم باعث می‌شود که یون‌ها در نواحی لبه‌ای کاتد، بیشتر تجمع کنند و در نتیجه، ضخامت لایه رسوب در این نواحی بیشتر از مرکز باشد، که این امر موجب کاهش یکنواختی توزیع ضخامت لایه می‌شود.

اما در حضور میدان مغناطیسی نیم تسلا تغییرات قابل توجهی در ضخامت و یکنواختی لایه ایجاد شد. ضخامت لایه در مرکز کاتد 4.5×10^{-4} m و در لبه‌ها به 5.1×10^{-4} m افزایش یافته است. علاوه بر این، میدان مغناطیسی باعث بهبود یکنواختی لایه رسوبی شده است. این امر ناشی از اثر نیروی لورنتس بر یون‌های باردار در الکترولیت است که مسیر حرکت یون‌ها را اصلاح کرده و آن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تر در سطح کاتد پخش می‌کند. نیروی لورنتس که در حضور میدان مغناطیسی به یون‌های در حال حرکت وارد می‌شود، سبب ایجاد جریان‌های یونی چرخشی در محلول الکترولیت می‌شود. این جریان‌ها علاوه بر افزایش انتقال جرم به سطح کاتد، حرکت یون‌ها را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنند که توزیع آن‌ها یکنواخت‌تر شود. برخلاف حالت بدون میدان مغناطیسی که در آن تمرکز یون‌ها در برخی نواحی بیشتر است، حضور میدان مغناطیسی یون‌ها را از مناطق با غلظت بالا به مناطق با غلظت پایین هدایت می‌کند و در نتیجه یکنواختی لایه را بهبود می‌بخشد. از مزایای سلول الکتروشانی مگنتوهیدرودینامیک با آند مارپیچی افزایش 25٪ در ضخامت لایه نسبت به سلول الکتروشانی در یک نمونه با رسانندگی الکترولیت برابر با $0.884 \frac{S}{m}$ است. همان گونه که در شکل ۴ مشخص است، یکنواختی لایه رسوب در سلول الکتروشانی مگنتوهیدرودینامیک به‌طور قابل توجهی بهبود یافته و به $60 \mu m$ رسیده است، در حالی که این مقدار در سلول الکتروشانی $90 \mu m$ اندازه‌گیری شد. این بهبود قابل توجه در یکنواختی، بیانگر توزیع بهتر رسوب در حضور میدان مغناطیسی است. این موضوع تأکید می‌کند که میدان مغناطیسی نه تنها یکنواختی سطح را بهبود می‌دهد، بلکه می‌تواند، علاوه بر افزایش ضخامت لایه، توزیع یکنواخت‌تری را بر سطح کاتد ایجاد می‌کند. این بهبود به تأثیر نیروی لورنتس بر حرکت یون‌ها در الکترولیت مربوط است و نرخ انتقال جرم به سطح کاتد را افزایش می‌دهد. در فرآیندهای الکتروشانی مگنتوهیدرودینامیک، میدان مغناطیسی می‌تواند بر توزیع جریان در سلول تأثیر گذاشته و باعث ایجاد پدیده‌هایی مانند جریان‌های گردابی شود. این پدیده‌ها می‌توانند بر یکنواختی ضخامت لایه رسوب و کیفیت آن تأثیر بگذارند. شکل مارپیچی آند نیز باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر در اطراف کاتد می‌شود. این امر به بهبود کیفیت و یکنواختی لایه رسوب کمک می‌کند.



شکل (۴): تأثیر اعمال میدان مغناطیسی نیم تسلا بر بهبود یکنواختی سطح در فرآیند الکتروشانی.

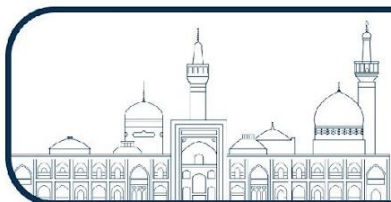


۴- بحث و نتیجه گیری:

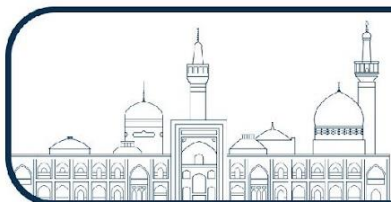
در پژوهش حاضر، یک مدل ریاضی مبتنی بر شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای توصیف فرآیند الکترونشانی مگنتوهیدرودینامیک با استفاده از آند مارپیچی جهت تولید چشمه استاندارد ^{60}Co توسعه داده شد و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی نیم تسلا، با ایجاد نیروی لورنتس و اصلاح مسیر حرکت یون‌ها، موجب افزایش ۶/۲۵٪ در ضخامت لایه رسوبی و بهبود یکنواختی آن شد، به‌طوری‌که یکنواختی سطح از ۹۰ به ۶۰ میکرومتر کاهش یافت. همچنین، افزایش رسانندگی الکترولیت از ۰/۰۸۸۴ به ۱/۷۶۸ زیمنس بر متر، چگالی جریان را تقویت کرده و ضخامت لایه رسوبی را تا مقدار $5.1 \times 10^{-4} \text{ m}$ افزایش داد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین [۹-۱۰] هم‌سو بوده و تأیید می‌کند که نیروی لورنتس نه تنها باعث افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود، بلکه توزیع و یکنواختی رسوب‌دهی را نیز بهبود می‌بخشد. این اثرات ناشی از اعمال میدان مغناطیسی است که موجب حرکت مارپیچی یون‌ها تحت تأثیر نیروی لورنتس شده و مسیر حرکت آن‌ها را اصلاح می‌کند. در نتیجه، توزیع یکنواخت‌تری از یون‌ها در محلول ایجاد شده و کارایی فرآیند الکترونشانی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از آند مارپیچی به دلیل ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت‌تر در اطراف کاتد، کیفیت نهایی رسوب را ارتقا داد. از دیدگاه آزمایشگاهی، این پژوهش تأکید می‌کند که به‌کارگیری میدان مغناطیسی در فرآیند الکترونشانی، روشی مؤثر برای افزایش بازدهی، یکنواختی، و کیفیت چشمه‌های استاندارد ^{60}Co محسوب می‌شود. مدل‌سازی ارائه‌شده در نرم‌افزار کامسول به‌عنوان شبیه‌سازی کارآمد برای تحلیل، پیش‌بینی و بهینه‌سازی شرایط فرآیند معرفی گردید. این مدل ضمن فراهم آوردن امکان کنترل دقیق ضخامت و یکنواختی لایه رسوب، نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و توسعه روش‌های نوین تولید چشمه‌های استاندارد رادیواکتیو ایفا می‌کند.

۵- مراجع:

- [۱] Zhang, H., and U. O. Häfeli. "Preparation and characterization of radioactive $\text{Co}/^{188}\text{Re}$ stents intended for lung cancer treatment using an electrodeposition method." *Journal of Medical Engineering & Technology* ۲۸, no. ۵ (۲۰۰۴): ۱۹۷-۲۰۴.
- [۲] Tsoulfanidis, Nicholas, and Sheldon Landsberger. *Measurement and detection of radiation*. CRC press, ۲۰۲۱.
- [۳] Knoll, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, ۲۰۱۰.
- [۴] García-Toraño, Eduardo. "Current status of alpha-particle spectrometry." *Applied radiation and isotopes* ۶۴, no. ۱۰-۱۱ (۲۰۰۶): ۱۲۷۳-۱۲۸۰.
- [۵] Da Cruz, P. A. L., and R. Poledna. "Alpha-source preparation by electrodeposition." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۲۸۶, no. ۳ (۱۹۹۰): ۴۵۳-۴۵۶.
- [۶] N. Obaid, R. Sivakumaran, J. Lui, and A. Okunade. "Modelling the electroplating of hexavalent chromium." In *COMSOL Conference*. Boston ۲۰۱۳.
- [۷] Hossain Bhuiyan, Md Emran, and Majid Minary-Jolandan. "Computational analysis of copper electrodeposition into a porous preform." *AIP Advances* ۱۲, no. ۵ (۲۰۲۲).
- [۸] Robert N. O'Brien, "The magnetohydrodynamic effect in electrochemical systems including batteries." *ECS Transactions* ۳, no. ۳۷ (۲۰۰۷): ۲۳.



- [۹] Hinds, G., J. M. D. Coey, and M. E. G. Lyons. "Influence of magnetic forces on electrochemical mass transport." *Electrochemistry communications* ۳, no. ۵ (۲۰۰۱): ۲۱۵-۲۱۸.
- [۱۰] Lorena M.A. Monzon, and John Michael David Coey. "Magnetic fields in electrochemistry: The Lorentz force. A mini-review." *Electrochemistry Communications* ۴۲ (۲۰۱۴): ۳۸-۴۱.
- [۱۱] National Research Council, et al. *Research Needs for High-Level Waste Stored in Tanks and Bins at US Department of Energy Sites: Environmental Management Science Program*. National Academies Press, ۲۰۰۱.
- [۱۲] TECDOC, IAEA. "۱۵۱۲, Production techniques and quality control of sealed radioactive sources of palladium-۱۰۳, iodine-۱۲۵, iridium-۱۹۲ and ytterbium-۱۶۹." International Atomic Energy Agency (۲۰۰۶).
- [۱۳] Mathew, C., M. A. Majali, and S. A. Balakrishnan. "A novel approach for the adsorption of iodine-۱۲۵ on silver wire as matrix for brachytherapy source for the treatment of eye and prostate cancer." *Applied radiation and isotopes* ۵۷, no. ۳ (۲۰۰۲): ۳۵۹-۳۶۷.
- [۱۴] Pappalardo, G., J. De Sanoit, A. Musumarra, G. Calvi, and C. Marchetta. "Feasibility study of a portable PIXE system using a ^{210}Po alpha source." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* ۱۰۹ (۱۹۹۶): ۲۱۴-۲۱۷.
- [۱۵] Enomoto, Shigemasa, M. Senoo, and S. Maeda. "New method for preparation of a ceramic strontium-۹۰ titanate β -ray source." *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes* ۲۶, no. ۶-۷ (۱۹۷۵): ۳۶۳-۳۶۶.
- [۱۶] De Sanoit, J., B. Leprince, Ch Bobin, and J. Bouchard. "Freeze-drying applied to radioactive source preparation." *Applied radiation and isotopes* ۶۱, no. ۶ (۲۰۰۴): ۱۳۹۱-۱۳۹۵.
- [۱۷] Yue, Bowen, Guangming Zhu, Yanwei Wang, Jianbo Song, Zheng Chang, Nana Guo, and Mianguang Xu. "Uncertainty analysis of factors affecting coating thickness distribution during nickel electrodeposition." *Journal of Electroanalytical Chemistry* ۸۹۱ (۲۰۲۱): ۱۱۵۲۷۴.
- [۱۸] Hashemi, S. Mohammad H., Petr Karnakov, Pooria Hadikhani, Enrico Chinello, Sergey Litvinov, Christophe Moser, Petros Koumoutsakos, and Demetri Psaltis. "A versatile and membrane-less electrochemical reactor for the electrolysis of water and brine." *Energy & Environmental Science* ۱۲, no. ۵ (۲۰۱۹): ۱۵۹۲-۱۶۰۴.
- [۱۹] Monzon, Lorena MA, and J. M. D. Coey. "Magnetic fields in electrochemistry: The Kelvin force. A mini-review." *Electrochemistry Communications* ۴۲ (۲۰۱۴): ۴۲-۴۵.
- [۲۰] P. Sahoo, and S. V. Narasimhan. "Electrodeposition of Cobalt at Trace Levels with a Special Reference to Preparation of ^{60}Co Source." *Radiochimica Acta* ۸۱, no. ۳ (۱۹۹۸): ۱۵۷-۱۶۲.



تهیه و تعیین خصوصیات ساختاری و فیزیکی نانوذرات اکسید ساماریم خالص و اکسید ساماریم گرافن دار جهت حفاظت در برابر تشعشع گاما: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده (کد مقاله : ۱۲۷۰)

باقری خطیبانی، عباس^۱ - خوشحال، امیررضا^۲

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده:

امروزه استفاده از مواد زیست‌سازگار و غیرسمی به عنوان جایگزین سرب برای حفاظت پرتوی اهمیت زیادی یافته است. در این مطالعه، نانوساختارهای اکسید ساماریم خالص و اکسید ساماریم گرافن دار با روش هیدروترمال سنتز و خواص فیزیکی آن‌ها با روش‌هایی مانند پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و رامان (Raman) بررسی شد. پارامترهای مهم مرتبط با ویژگی‌های حفاظتی گاما شامل ضریب تضعیف جرمی (MAC)، میانگین مسیر آزاد (MFP)، لایه نیمه‌کاهشی (HVL)، لایه یک‌دهم‌کاهشی (TVL) ضریب تضعیف خطی (LAC)، ضریب انتقال (TF) و بازدهی حفاظت در برابر تابش (RPE) برای نمونه اکسید ساماریم گرافن دار به صورت تجربی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد افزودن گرافن، ساختار اکسید ساماریم را تغییر داده و ویژگی‌های حفاظتی گاما نظیر ضرایب تضعیف جرمی که برابر $0.59 \text{ cm}^2/\text{g}$ و ضرایب تضعیف خطی برابر 4.2 cm^{-1} می‌باشد را بهبود داده است. همچنین در این مطالعه، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو *GEANT4* (Geometry And Tracking) ساختارها شبیه‌سازی شدند و پارامترهای حفاظت پرتوی محاسبه گردیدند. نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان دادند که تضعیف پرتو گاما برای نمونه گرافن دار به ترتیب ۱۹.۲٪ و ۱۸.۶٪ بوده و این ماده می‌تواند محافظ پرتوی مؤثری باشد.

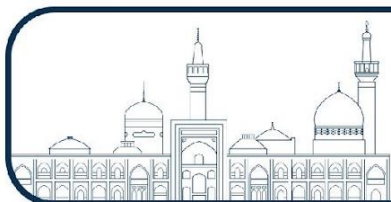
کلمات کلیدی: حفاظت پرتوی گاما، ساماریم اکساید، گرافن، روش هیدروترمال، کد مونت کارلو *GEANT4*

Preparation and determination of structural and physical properties of pure samarium oxide and graphene-added Samarium oxide nanoparticles for gamma ray protection: Comparison of experimental and simulated results

Bagheri Khatibani, Abbas^{۱*}, Khoshhal, Amir Reza^۲

۱. Nano Research Lab, Lahijan Islamic Azad University, Lahijan, Iran

۲. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran



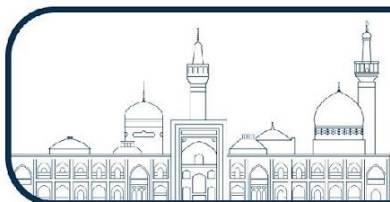
Abstract:

The use of environmentally sensitive and nontoxic material as alternatives to lead for radiation shielding has gained significant importance in recent years. In this study, pure samarium oxide and graphene-doped samarium oxide nanostructures were synthesized using the hydrothermal method. Their physical properties were analyzed using techniques such as X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FESEM), and Raman spectroscopy. Key parameters associated with gamma radiation shielding, including mass attenuation coefficient (MAC), mean free path (MFP), half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), linear attenuation coefficient (LAC), transmission factor (TF) and radiation protection efficiency (RPE) were experimentally measured for the graphene-doped samarium oxide sample. The results revealed that the addition of graphene altered the structure of samarium oxide and enhanced its gamma shielding properties, with the MAC and LAC values being $0.59 \text{ cm}^2/\text{g}$ and 4.2 cm^{-1} , respectively. Furthermore, the Monte Carlo simulation code Geo-metry ANd Tracking (GEANT⁴) was employed to model the structures and compute the radiation shielding parameters. Both the experimental and simulated results demonstrated gamma ray attenuation of 19.2% and 18.6% for the graphene-doped sample, respectively, confirming its potential as an effective radiation shielding material.

Key words: Gamma shielding, Samarium oxide, Graphene, Hydrothermal method, GEANT⁴ Monte Carlo code

۱- مقدمه:

اکسیدهای عناصر خاکی کمیاب یا اکسیدهای لانتانید به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلفی از جمله ابزارهای نوری، دستگاه‌های لومینسانس، کاتالیزورهای ناهمگن، صنایع شیشه، سلول‌های سوختی، پروب‌های بیوشیمیایی و تشخیص‌های پزشکی به کار می‌روند. از آنجایی که یون‌های عناصر خاکی کمیاب به طور کلی در حالت سه ظرفیتی قرار دارند، ترکیبات پایداری را تشکیل می‌دهند. خواص شیمیایی، نوری و الکترونیکی این ترکیبات توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در میان اکسیدهای خاکی کمیاب، اکسید ساماریم به عنوان یک نیمه‌رسانای نوع p تمایل دارد به راحتی اکسیژن شبکه‌ای را با هوا تبادل کند. این فرایند روشی مؤثر برای حفظ استوکیومتری اکسیدها محسوب می‌شود [۱، ۲]. شکل و اندازه ذرات نقش حیاتی در مهندسی خواص مواد ایفا می‌کنند و بر ویژگی‌های نوری، مغناطیسی و الکترونیکی آن‌ها تأثیرگذار هستند [۳]. مواد نانوساختار، به‌ویژه آن‌هایی که شامل یون‌های عناصر خاکی کمیاب هستند، در برابر تابش پایدار بوده و خواصی منحصر به فرد نسبت به فرم توده‌ای خود نشان می‌دهند [۴]. نانو بلورهای اکسید ساماریم با شکل کنترل شده، کاربردهای گسترده‌ای در حسگرها، نانوالکترونیک و سلول‌های خورشیدی دارند [۲]. با این حال، اکسیدهای عناصر خاکی کمیاب مانند ساماریم و سریم معمولاً از رسانایی الکتریکی پایین رنج می‌برند، که می‌تواند با ترکیب آن‌ها با ساختارهای مبتنی بر گرافن این ضعف را بهبود بخشد [۵]. گرافن، به عنوان یک لایه تک اتمی از کربن، به دلیل خواص استثنایی حرارتی، مکانیکی و نوری خود شناخته شده است، از جمله رسانایی بالا، الاستیسیته و پایداری شیمیایی، ساختار دوبعدی منحصر به فرد و سطح ویژه بالای آن، گرافن را به چارچوبی ایده‌آل برای مواد هیبریدی تبدیل کرده است [۶، ۷]. ترکیب گرافن با اکسیدهای فلزی مانند ZnO ، MnO و CeO_2 باعث بهبود خواص آن از طریق جلوگیری از بازچینش صفحات، افزایش دسترسی به سطح و کاهش مقاومت داخلی می‌شود و آن را برای کاربردهای پیشرفته ایده‌آل می‌سازد [۸]. استفاده روزافزون از منابع پرتویی در زمینه‌های مختلف مانند انرژی هسته‌ای، پرتودرمانی و



تشخیص پزشکی اهمیت حفاظت پرتویی را برجسته می‌کند. اگرچه مواد مبتنی بر سرب به دلیل بازده بالای جذب پرتو گاما به طور گسترده‌ای برای محافظت در برابر تابش استفاده شده‌اند، مطالعات اخیر مواد جایگزینی مانند سیستم‌های شیشه‌ای و نانوکامپوزیت‌ها را برای بهبود ویژگی‌های حفاظتی پیشنهاد می‌کنند. به عنوان مثال، شیشه‌های مبتنی بر PbO، سیستم‌های $2\text{WO}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-TeO}$ و شیشه‌های تقویت‌شده با $3\text{Sm}_2\text{O}$ در ترکیبات تالیوم-بورات به طور قابل توجهی پارامترهای حفاظتی مانند ضرایب تضعیف جرمی (MAC)، لایه نیمه‌کاهشی (HVL) و میانگین مسیر آزاد (MFP) را بهبود می‌بخشند [۹-۱۲].

در این مطالعه، نانوکامپوزیت‌های اکسید ساماریم خالص و گرافن‌دار با استفاده از روش هیدروترمال تهیه شدند. خواص ساختاری این نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از روش‌های XRD، FESEM و رامان مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد حفاظتی این نانوکامپوزیت‌ها در برابر پرتو گامای چشمه ^{137}Cs به صورت تجربی ارزیابی و نتایج آن با شبیه‌سازی کد GEANT ۴ مقایسه شد. این تحقیق، نانوکامپوزیت اکسید ساماریم گرافن‌دار را به عنوان یک محافظ پرتویی گاما معرفی می‌کند و پایه‌ای برای ترکیب رویکردهای تجربی و شبیه‌سازی در مطالعات حفاظت پرتویی فراهم می‌سازد.

۲- روش کار:

۲-۱- بخش تهیه ماده

برای تهیه نانوساختار اکسید ساماریم، مقدار مشخصی از $30.6\text{H}_2\text{O}(\text{NO}_3)\text{Sm}$ در $12/5$ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد. این محلول هم‌زده شد تا تا یک محلول 0.06 مولار به دست آید. برای تنظیم میزان pH، آمونیاک به صورت قطره‌ای به محلول اضافه شد. همچنین، $12/5$ میلی‌لیتر ستیل تری‌متیل آمونیوم بروماید (CTAB) به این ترکیب اضافه گردید. پس از آن، محلول به یک اتوکلاو 100 میلی‌لیتری منتقل شده، مهر و موم و در دمای 120 درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت قرارداده شد. رسوب حاصل ابتدا از طریق سانتریفیوژ جدا شد، سپس چندین بار با آب مقطر و اتانول شسته شد و در نهایت در دمای 600 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت بازپخت شد.

برای تهیه نانوکامپوزیت اکسید ساماریم گرافن‌دار، 80 میلی گرم از اکسید ساماریم تهیه‌شده به 50 میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و به مدت 30 دقیقه هم‌زده و 30 دقیقه در اولتراسونیک قرار گرفت. سپس 30 میلی گرم گرافن به این محلول اضافه شد و این فرآیند با یک ساعت هم‌زدن و 30 دقیقه قرارگیری در اولتراسونیک ادامه یافت. محصول نهایی به اتوکلاو 100 میلی‌لیتری منتقل، مهر و موم و در دمای 90 درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت قرارداده شد. در مراحل بعدی، ماده به دست آمده با استفاده از سانتریفیوژ، با آب مقطر و اتانول شست‌وشو داده شد و در دمای 70 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت جهت بازپخت قرار گرفت.

۲-۲- بخش تجربی و پارامترهای حفاظت پرتوی

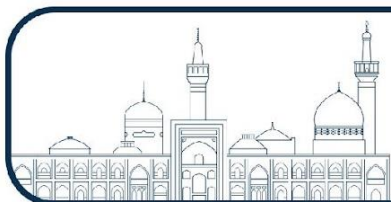
نانومواد به شکل قرص در آمدند و مابین یک چشمه ایزوتروپیک سزیم ^{137} با اکتیویته $8/7$ میکروکوری و آشکارساز گایگرمولر با فاصله 20 میلی‌متر از هرکدام قرار گرفتند. آزمون‌ها برای هر ماده به مدت 5 دقیقه، 5 بار تکرار شدند تا خطای ناشی از آن کاهش یابد.

ضریب تضعیف خطی (LAC) کیفیت حفاظتی یک ماده جاذب در برابر تابش‌های هسته‌ای را ارزیابی می‌کند. مقدار LAC از طریق رابطه بیر-لامبرت (Beer-Lambert) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$\mu = \ln \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

x ضخامت نمونه است و I_0 و I به ترتیب شمارش فوتون‌ها با حضور و بدون حضور نمونه هستند.

ضریب تضعیف جرمی (MAC) کیفیت جذب یک ماده را تعیین می‌کند و از نسبت ضریب تضعیف خطی به چگالی ماده جاذب به دست می‌آید. در این پژوهش، مقادیر MAC با استفاده از رابطه زیر محاسبه شدند [۱۳]:



$$\mu_m = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2)$$

در این رابطه، w_i کسر وزنی و $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ ضریب تضعیف جرمی برای هر عنصر موجود در ترکیب است. میانگین مسیر آزاد (MFP) به فاصله متوسطی اطلاق می‌شود که یک الکترون در یک نمونه مشخص طی می‌کند پیش از آنکه با ماده برهم‌کنش داشته باشد [۱۳]:

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

ضخامت موردنیاز برای کاهش شدت پرتو تابشی به نصف مقدار اولیه خود قبل از عبور از ماده جاذب، لایه نیمه‌کاهشی (HVL) نامیده می‌شود. این مقدار می‌تواند با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود [۱۳]:

$$HLV = \ln \ln \frac{I_0}{I} \quad (4)$$

لایه یک‌دهم کاهشی (TVL) به ضخامت ماده جاذبی اطلاق می‌شود که برای کاهش شدت پرتو گامای تابشی به یک‌دهم مقدار اولیه آن در یک انرژی مشخص موردنیاز است [۱۳]:

$$TVL = \ln \ln \frac{I_0}{I} \quad (5)$$

ضریب انتقال (TF) با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

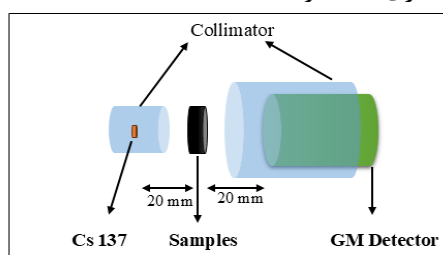
$$TF = \frac{I}{I_0} = \frac{N}{N_0} \quad (6)$$

یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی اثربخشی حفاظ‌های پرتویی، بازدهی حفاظت در برابر تابش (RPE) است که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

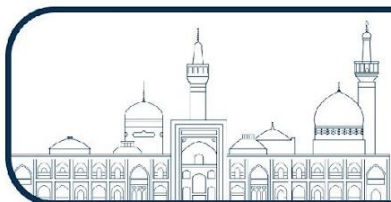
$$RPE(\%) = (1 - TF) \times 100 \quad (7)$$

۲-۳- بخش شبیه‌سازی

در این مطالعه از کد ۴GEANT برای شبیه‌سازی قابلیت‌های حفاظتی استفاده شد. ۴GEANT امکان شبیه‌سازی عبور ذرات از مواد، شامل مدل‌های فیزیکی، ردیابی، تصویرسازی و مدیریت هندسه را فراهم می‌کند. این کد با محدوده انرژی ۱ الکترون‌ولت تا ترا الکترون‌ولت، شرایط واقعی نزدیک به آزمایشگاه را شبیه‌سازی می‌کند. ۴GEANT که با استفاده از فناوری شیء‌گرایی در زبان ++C توسعه یافته، کاربردهایی در فیزیک پزشکی، هسته‌ای، ذرات، طراحی شتاب‌دهنده‌ها و مهندسی فضایی دارد [۱۴]. در این پژوهش، مدل فیزیکی FTFP_BERT_HP که به عنوان یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های موجود در ۴GEANT، به‌ویژه در کاربردهای پرتودرمانی با پروتون شناخته می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه از نسخه ۱۱.۱.۳ ابزار ۴GEANT بهره برد و محاسبات بر روی پردازنده‌ای با ۴ هسته و ۶ گیگابایت حافظه رم انجام شد. ابتدا چشمه ایزوتروپیک ۱۳۷-Cs با انرژی گامای ۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت، نمونه‌های Sm_2O_3 و $Sm_2O_3/graphene$ و همچنین آشکارساز گایگر-مولر با هندسه مشخص تعریف شدند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فاصله بین چشمه و نمونه و همچنین فاصله بین نمونه و آشکارساز به ترتیب ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس با تعریف ۱۰ میلیون ذره، تعداد ذراتی که به آشکارساز رسیدند به عنوان خروجی شبیه‌سازی ثبت گردید.



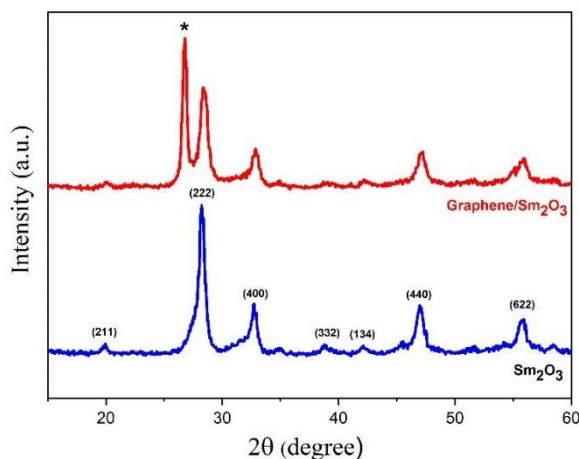
شکل (۱) نحوه شبیه‌سازی با ابزار ۴GEANT



۳- نتایج و بحث:

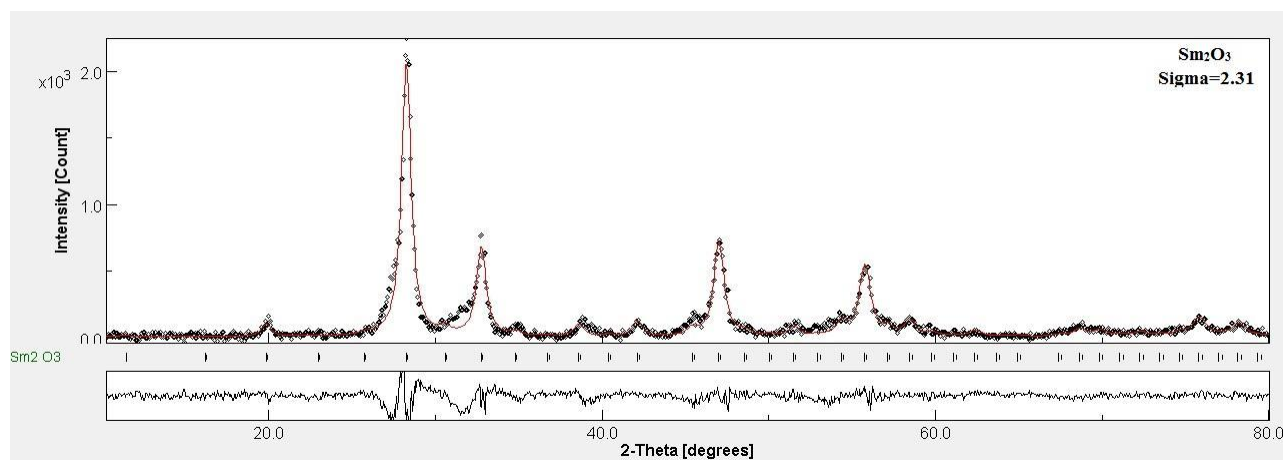
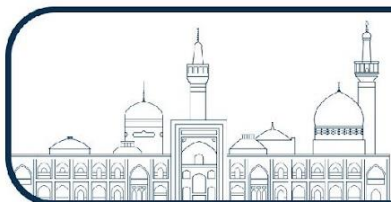
۳-۱- نتایج آنالیز XRD

الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) دو نمونه و شاخص‌های میلر آن‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند، در حالی که کارت JCPDS شماره: ۴۳-۱۰۲۹ بهترین تطابق را با نتایج ما نشان می‌دهد. صفحات بلوری (۲۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۳۳۲)، (۱۳۴)، (۴۴۰) و (۶۲۲) در نمودار XRD مربوط به Sm_2O_3 به ساختار مکعبی اکسید ساماریوم نسبت داده می‌شوند [۵]. طبیعت چندبلوری نمونه به وضوح مشخص است. قله پراش تیز در مقدار 2θ برابر با ۲۶.۸ درجه می‌تواند به صفحه (۰۰۲) گرافن نسبت داده شود که مطابق با کارت JCPDS شماره: ۰۸-۰۴۱۵ است. این قله در شکل ۱ با یک ستاره مشخص شده است. پارامترهای شبکه محاسبه شده و در جدول ۱ ارائه شده‌اند. مقادیر محاسبه شده برای صفحه خاص (۲۲۲) نزدیک به مقادیر استاندارد مرتبط قرار گرفته‌اند تا مقایسه آسان‌تر شود. پارامترهای شبکه به دست آمده به دلیل افزودن گرافن تغییر یافته‌اند که ممکن است به قانون وگارد نسبت داده شود. علاوه بر این، انرژی سطحی نیز می‌تواند تحت تأثیر افزودن گرافن قرار گیرد. در این زمینه، دانه‌هایی که انرژی سطحی کمتری دارند ممکن است منتقل شوند و حرکت اتم‌ها به مکان‌هایی با انرژی سطحی کمتر، این تغییرات را تسهیل می‌کند.

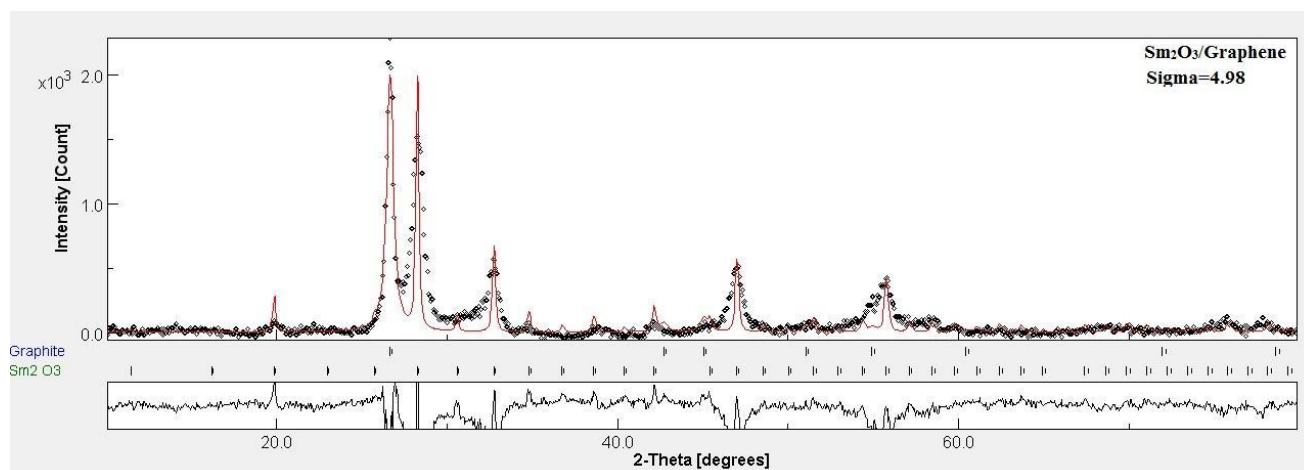


شکل (۲) پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به Sm_2O_3 و $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ گرافن‌دار همراه با شاخص‌های میلر مرتبط. علامت ستاره نشان‌دهنده حضور گرافن است.

الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌ها نیز با استفاده از تحلیل اصلاح ریتولد (Rietveld refinement) در نرم‌افزار MAUD مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای مربوطه در شکل ارائه شده‌اند. صرف‌نظر از مقادیر عددی، مقایسه بصری بین الگوی تجربی و محاسبه شده و همچنین اطمینان از صحت شیمیایی مدل، از روش‌های تعیین کیفیت برازش ریتولد محسوب می‌شوند. اختلاف بین داده‌های تجربی و محاسبه شده ناچیز است. با بررسی دقیق‌تر، مشاهده می‌شود که تمامی قله‌های اصلی مربوط به ساختار Sm_2O_3 تطابق خوبی با نمونه استاندارد دارند. در مورد نمونه حاوی گرافن، همخوانی مطلوبی بین قله‌های تجربی با قله‌های مربوط به اکسید ساماریوم (Sm_2O_3) و همچنین قله‌های مرتبط با گرافن وجود دارد. با این حال، میزان خطای برازش در نمونه Sm_2O_3 کمتر از نمونه $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ است (به ترتیب ۲/۳۱ در مقابل ۴/۹۸).



(الف)

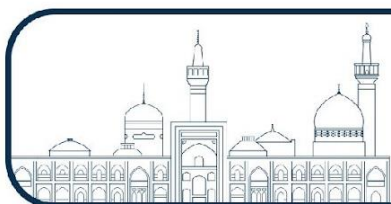


(ب)

شکل (۳) تطابق میان نمونه استاندارد مرجع و نمونه های SmO (الف) و SmG (ب) به کمک نرم افزار MAUD

جدول ۱: مقادیر محاسبه شده (cal.) و استاندارد (sta.) پارامترهای شبکه برای قله اصلی (۲۲۲)

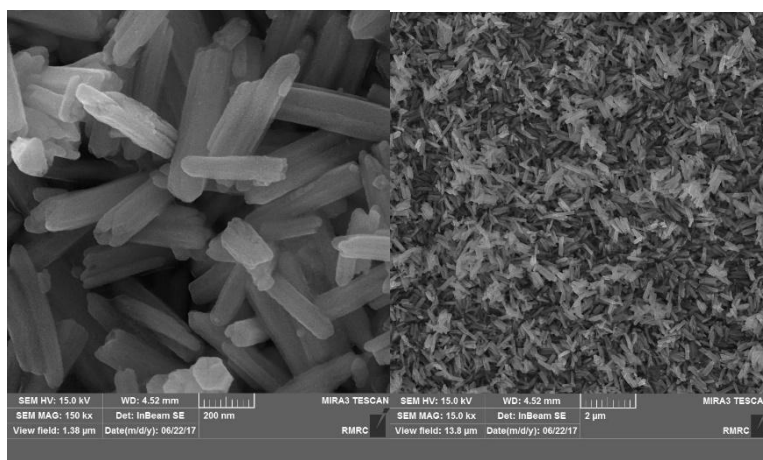
Sample	Miller indices	d (Å)		a (Å)		Volume of unit cell (Å) ^۳	
		Cal.	Sta	Cal.	Sta	Cal.	Sta.
			a.		.		



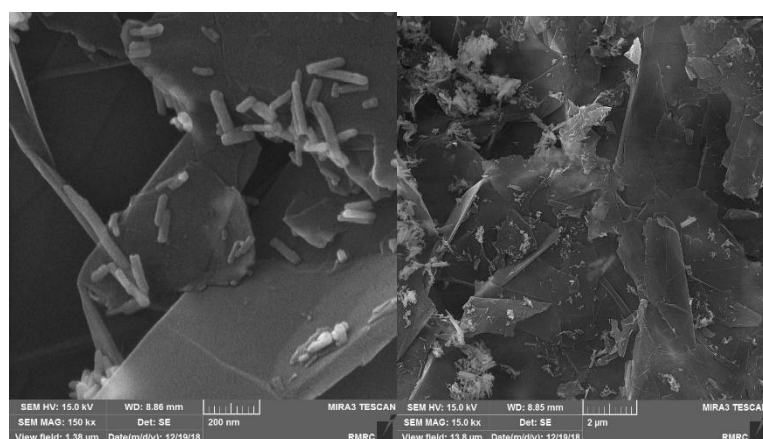
Sm_2O_3	۲۲۲	۳.۱۶۸ ± ۰.۰۰۰	۳.۱۵۴	۱۰.۹۷۳ ± ۰.۰	۱۰.۹۲	۱۳۲۱.۰۶ ± ۰.۰	۱۳۰۴.۶
		۴		۰.۴	۷	۱	۸
$\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$	۲۲۲	۳.۱۵۷ ± ۰.۰۰۰	۳.۱۵۴	۱۰.۹۳۷ ± ۰.۰	۱۰.۹۲	۱۳۰۸.۰۹ ± ۰.۰	۱۳۰۴.۶
		۹		۰.۹	۷	۰.۱	۸

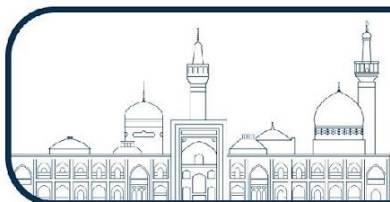
۳-۲- نتایج آنالیز FESEM

تصاویر میکروگراف‌های شکل ۳ نشان‌دهنده نانومیل‌های Sm_2O_3 و نانوکامپوزیت $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Graphene}$ در مقیاس‌های مختلف است. نانومیل‌های Sm_2O_3 عمدتاً به صورت افقی رشد کرده‌اند و میانگین طول و قطر آن‌ها به ترتیب حدود ۴۰۰ و ۸۰ نانومتر است. نانومیل‌های Sm_2O_3 در محدوده ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر توسط صفحات گرافن پیچیده شده‌اند، که ساختار نانوکامپوزیتی شبیه به ساندویچ ایجاد کرده و از تجمع نانومیل‌ها و انباشته شدن صفحات گرافن جلوگیری می‌کند، در نتیجه سطح مناسب آن‌ها حفظ می‌شود.



(a)



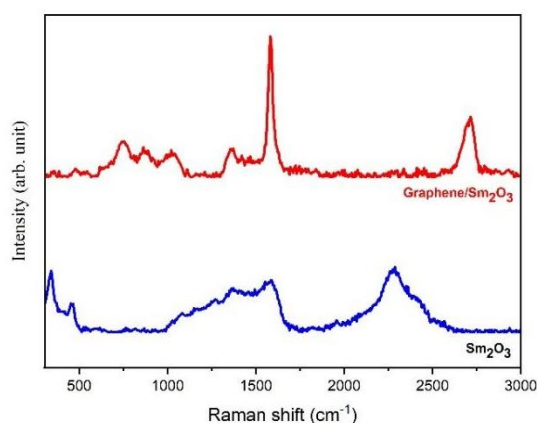


(b)

شکل (۳) تصاویر FESEM از نانومیله‌های اکسیدساماریم شکل داده شده بر روی صفحات نانوگرافن در مقیاس‌های μm^2 و 200 nm برای نانومیله‌های اکسید ساماریم (a)، و نانوذرات اکسید ساماریم گرافن‌دار (b).

۳-۳- نتایج آنالیز رامان

تحلیل رامان یک روش مؤثر برای بررسی نقص‌ها و ویژگی‌های آلایش در ساختارهای مختلف است. داده‌های رامان نمونه‌های Sm_2O_3 بین 300 cm^{-1} تا 3000 cm^{-1} ذخیره شده و قله‌های مشخصی در 1400 cm^{-1} و 1500 cm^{-1} به ارتعاشات ارگانیک (C-C و C-H) نسبت داده می‌شوند (شکل ۴). قله‌های در 340 و 450 cm^{-1} به ساختار Sm_2O_3 و قله‌های در 1360 ، 1580 و 2700 cm^{-1} به ویژگی‌های گرافن (D، G و 2D) اختصاص دارند. شدت قله‌های مختلف اطلاعاتی در مورد نقص‌ها و بی‌نظمی ساختاری می‌دهند. نسبت شدت قله‌های I_D/I_G برای نمونه اکسید ساماریم گرافن‌دار برابر 0.62 است که نشان‌دهنده ساختار نسبتاً منظم و کم‌نقص است، در حالی که نسبت I_{2D}/I_G برابر 2.1 است.

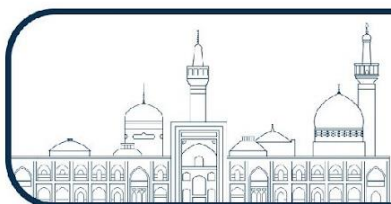


شکل (۴) طیف رامان اکسید ساماریوم خالص و اکسید ساماریم گرافن‌دار

۳-۴- نتایج تجربی و شبیه‌سازی

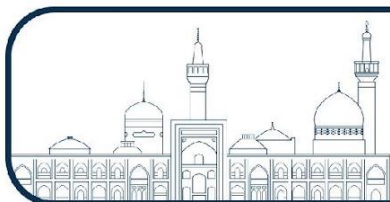
داده‌های به‌دست‌آمده از ضریب جذب خطی، ضریب جذب جرمی، ضخامت نیمه‌مقدار، ضخامت یک دهم مقدار و طول آزاد میانگین نمونه در جدول ۲ نشان داده شده است. ضریب جذب خطی، ضریب جذب جرمی، طول آزاد میانگین، ضخامت نیمه‌مقدار، ضخامت یک دهم مقدار، ضریب انتقال و بازدهی حفاظت در برابر تابش برای نانوذرات اکسید ساماریوم گرافن‌دار به ترتیب $4/2$ ، $0/59$ ، $0/23$ ، $0/16$ ، $0/54$ ، $0/8083$ و $19/17$ به‌دست آمده است.

با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، پارامترهای حفاظتی محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای شبیه‌سازی شده با مقادیر تجربی نزدیک هستند. نرخ جذب تجربی و شبیه‌سازی شده برای اکسید ساماریم گرافن‌دار به ترتیب 19.17 و 18.61 است. همچنین، درصد جذب شبیه‌سازی شده برای اکساید ساماریم با شرایط یکسان برابر با 15.36% است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین این دو مقدار وجود دارد.



Sample	LAC (cm ⁻¹)	MAC (cm ² /g)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	TF	RPE (%)
Sm ² O ₃ /Graphene	۴.۲۰۰	۰.۵۹۰	۰.۲۳۰	۰.۱۶۰	۰.۵۴۰	۰.۸۰۸۳	۱۹.۱۷
	±	±	±	±	±	±	±
	۰.۰۰۹	۰.۰۰۳	۰.۰۰۹	۰.۰۰۱	۰.۰۰۷	۰.۰۰۲۰	۰.۲۰

جدول ۲: نتایج پارامترهای حفاظت از تابش برای اکسید ساماریوم گرافن‌دار



Sample	LAC (cm ⁻¹)	MAC (cm ² /g)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	TF	RPE (%)
Sm ² O ₃	۳.۳۳۵±۰.۰۲	۰.۴۷۵±۰.۰۰۷	۰.۲۹۹±۰.۰۰۳	۰.۲۰۷±۰.۰۰۶	۰.۶۹۰±۰.۰۰۸	۰.۸۴۶ ۴ ± ۰.۰۰۴ ۰	۱۵.۳۶ ± ۰.۰۴
Sm ² O ₃ / Graphene	۴.۱۱۶±۰.۰۳	۰.۵۸۰±۰.۰۰۹	۰.۲۴۲±۰.۰۰۸	۰.۱۶۸±۰.۰۰۳	۰.۵۵۹±۰.۰۰۷	۰.۸۱۳ ۹ ±	۱۸.۶۱ ± ۰.۰۶



						۰۰۰۶	
						.	

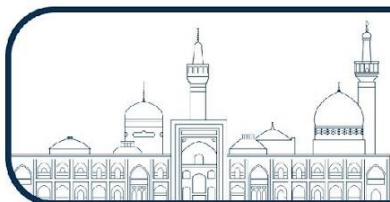
جدول ۳: نتایج پارامترهای حفاظتی تابش برای هر دو نمونه مرتبط با داده‌های شبیه‌سازی شده

۴- نتیجه گیری:

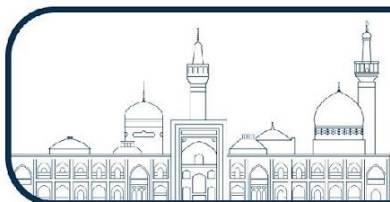
در این مقاله، نانوساختارهای اکسید ساماریوم خالص و ترکیب شده با گرافن از طریق روش هیدروترمال تهیه و ویژگی‌های اپتیکی، ساختاری و مورفولوژیکی آن‌ها بررسی شدند. داده‌های XRD نشان‌دهنده ماهیت پلی کریستالی نمونه‌ها و مشخصات ساختاری اکسید ساماریوم هستند. از نظر مورفولوژیکی، نانورودهای اکسید ساماریوم با طول و قطر متوسط ۴۰۰ و ۸۰ نانومتر مشاهده شد. پس از افزودن گرافن، توزیع نامنظم نانورودها در نانوکامپوزیت مشاهده گردید. تحلیل‌های رامان نیز به ارتعاشات خاص Sm-O و ساختار Sm_2O_3 اشاره دارند. پارامترهای حفاظتی تابش TVL، HVL، MAC، LAC و MFP برای هر دو نمونه به‌طور تجربی و شبیه‌سازی محاسبه شدند و نتایج نشان‌دهنده تطابق خوب بین این مقادیر است. حضور گرافن باعث بهبود پارامترهای حفاظتی شده و مقادیر LAC و MAC را حدود ۱۸٪ افزایش و مقادیر HVL و TVL را ۱۹٪ کاهش داده است. به‌طور کلی، اکسید ساماریوم گرافن‌دار به‌عنوان یک محافظ تابش گاما کارایی قابل توجهی نشان می‌دهد.

۵- مراجع:

- [۱] A. S. Dezfuli, M. R. Ganjali, and H. R. Naderi, "Anchoring samarium oxide nanoparticles on reduced graphene oxide for high-performance supercapacitor," *Applied Surface Science*, vol. ۴۰۲, pp. ۲۴۵-۲۵۳, ۲۰۱۷.
- [۲] M. M. Khan and S. N. Matussin, "Sm^۲O^۳ and Sm^۲O^۳-based nanostructures for photocatalysis, sensors, CO conversion, and biological applications," *Catalysis Science & Technology*, vol. ۱۳, no. ۸, pp. ۲۲۷۴-۲۲۹۰, ۲۰۲۳.
- [۳] S. Busatto and C. de Mello Donega, "Magic-size semiconductor nanostructures: Where does the magic come from?," *ACS Materials Au*, vol. ۲, no. ۳, pp. ۲۳۷-۲۴۹, ۲۰۲۲.
- [۴] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities," *Arabian journal of chemistry*, vol. ۱۲, no. ۷, pp. ۹۰۸-۹۳۱, ۲۰۱۹.
- [۵] M. Anitha, K. Velvizhi, M. M. Ismail, M. Shanmugam, M. Arivanandhan, and P. Anandan, "Enhanced electrochemical performance of rGO: Sm^۲O^۳ nanocomposite synthesized by hydrothermal assisted simple solution technique," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. ۳۳, no. ۳۶, pp. ۲۷۰۷۶-۲۷۰۹۱, ۲۰۲۲.
- [۶] A. Javaid and M. A. Farrukh, "Comparison of photocatalytic and antibacterial activities of allotropes of graphene doped Sm^۲O^۳ nanocomposites: Optical, thermal, and structural studies," *Journal of the Chinese Chemical Society*, vol. ۷۰, no. ۱, pp. ۳۲-۴۵, ۲۰۲۳.



- [۷] S. S. Niavol, A. B. Khatibani, H. M. Moghaddam, and G. Gao, "ZnO quantum dots decorated on graphene oxide and graphene nanoplatelets: Comparison the structure and sensing properties," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. ۱۶۰, p. ۱۱۱۹۵۷, ۲۰۲۴.
- [۸] A. S. Dezfuli, M. R. Ganjali, H. R. Naderi, and P. Norouzi, "A high performance supercapacitor based on a ceria/graphene nanocomposite synthesized by a facile sonochemical method," *Rsc Advances*, vol. ۵, no. ۵۷, pp. ۴۶۰۵۰-۴۶۰۵۸, ۲۰۱۵.
- [۹] S. A. Issa, M. Rashad, T. A. Hanafy, and Y. B. Saddeek, "Experimental investigations on elastic and radiation shielding parameters of WO_3 - B_2O_3 - TeO_2 glasses," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. ۵۴۴, p. ۱۲۰۲۰۷, ۲۰۲۰.
- [۱۰] A. Mostafa *et al.*, " PbO - Sb_2O_3 - B_2O_3 - CuO glassy system: evaluation of optical, gamma and neutron shielding properties," *Materials Chemistry and Physics*, vol. ۲۵۸, p. ۱۲۳۹۳۷, ۲۰۲۱.
- [۱۱] H. A. Saudi, H. O. Tekin, H. M. Zakaly, S. A. Issa, G. Susoy, and M. Zhukovsky, "The impact of samarium (III) oxide on structural, optical and radiation shielding properties of thallium-borate glasses: Experimental and numerical investigation," *Optical Materials*, vol. ۱۱۴, p. ۱۱۰۹۴۸, ۲۰۲۱.
- [۱۲] H. M. Zakaly *et al.*, "Glass fabrication using ceramic and porcelain recycled waste and lithium niobate: physical, structural, optical and nuclear radiation attenuation properties," *journal of materials research and technology*, vol. ۱۵, pp. ۴۰۷۴-۴۰۸۵, ۲۰۲۱.
- [۱۳] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of $ZnCo_2O_4$ and $ZnCo_2O_4$ /graphene nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.
- [۱۴] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۱۵] A. R. Khoshhal, A. Esmaili Torshabi, and S. Babamohammadi, "Investigation of the Produced Positrons and Their Dose Deposition at Bone and Soft Tissue Organs at Proton Therapy: A Simulation Study," *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, vol. ۳۲, no. ۱۵۵, pp. ۴۰۵-۴۱۴, ۲۰۲۴.



بررسی تجربی و شبیه‌سازی شده ویژگی‌های ساختاری و حفاظت در برابر تشعشع گاما نانوذرات اکسید ساماریم خالص و اکسید ساماریم دوپ شده با ایتیریم (کد مقاله: ۱۲۷۲)

خوشحال، امیررضا^۱ - کوکائیان، شاهین^۲ - باقری خطیبانی، عباس^{۳*} - آزادبر، علیرضا^۲

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۲. گروه مهندسی پرتو پزشکی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۳. آزمایشگاه تحقیقاتی نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

چکیده:

در سال‌های اخیر، تلاش‌ها برای توسعه مواد بدون سرب و سازگار با محیط زیست جهت مسائل حفاظت در برابر اشعه مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، نانوساختارهای اکسید ساماریم خالص (Sm_2O_3) و اکسید ساماریم دوپ‌شده با ایتیریم (۱۰٪ و ۲۰٪) با استفاده از روش سل-ژل سنتز شدند. تحلیل‌های ساختاری و ریخت‌شناسی شامل طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس انرژی پراش اشعه ایکس (EDX)، پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، ساختار مکعبی Sm_2O_3 را تأیید کرده و اصلاحات جزئی در ساختار و تعاملات بین ایتیریم و اکسید ساماریم را نشان دادند. پارامترهای کلیدی حفاظتی پرتو گاما شامل ضریب تضعیف جرمی (MAC)، ضریب تضعیف خطی (LAC)، لایه نیمه‌کاهش (HVL)، لایه یک‌دهم‌کاهش (TVL) و میانگین مسیر آزاد (MFP)، با افزودن ایتیریم بهبود قابل‌توجهی نشان دادند. شبیه‌سازی GEANT^۴ عملکرد حفاظتی را تأیید کرد و درصد تضعیف گاما برای Sm_2O_3 خالص، نمونه‌های دوپ‌شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ ایتیریم به ترتیب ۲۵.۲۱٪، ۲۵.۷۹٪ و ۲۶.۲۴٪ گزارش شد که نشان‌دهنده پتانسیل این مواد به‌عنوان محافظ‌های مؤثر در برابر پرتو گاما است.

کلمات کلیدی: حفاظت پرتوی گاما، ساماریم اکساید، ایتیریم، سل ژل، کد شبیه‌سازی مونت کارلو GEANT^۴

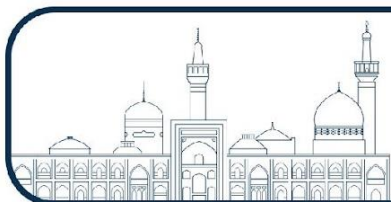
Experimental and Simulated Investigation of Structural and Gamma Radiation Shielding Properties of Pure Samarium Oxide and Yttrium-Doped Samarium Oxide Nanoparticles

Khoshhal, Amir Reza^۱, Kookaeyan, Shahin^۲, Bagheri Katibani, Abbas^{۳*}, Azadbar, Ali Reza^۲

۱. Graduate University of Advanced Technology, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Department of Nuclear Engineering

۲. Lahijan Islamic Azad University, Faculty of Technical and Engineering, Department of Medical Radiation

۳. Lahijan Islamic Azad University, Nano Research Lab



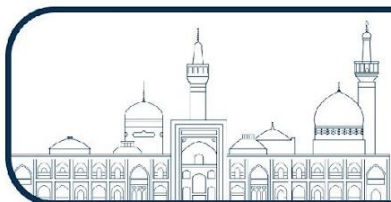
Abstract:

In recent years, efforts to develop lead-free, environmentally friendly materials for radiation shielding have gained attention. This study synthesized pure samarium oxide (Sm_2O_3) and yttrium-doped samarium oxide (۱۰٪ and ۲۰٪) nanostructures using the sol-gel method. Structural, optical, and morphological analyses, including dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray Diffraction (XRD) and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), confirmed the cubic structure of Sm_2O_3 and revealed minor structural modifications and interactions between yttrium and samarium oxide. Key gamma-ray shielding parameters, such as mass attenuation coefficient (MAC), linear attenuation coefficient (LAC), half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL) and mean free path (MFP), showed significant improvement with yttrium addition. The GEANT ϵ simulation validated the shielding performance, with attenuation percentages of ۲۵,۲۱٪ for pure Sm_2O_3 and ۲۵,۷۹٪ and ۲۶,۲۴٪ for ۱۰٪ and ۲۰٪ yttrium-doped samples, indicating their potential as effective gamma radiation shields.

Key words: Gamma shielding, Samarium oxide, yttrium, sol-gel method, GEANT ϵ Monte Carlo simulation code

۱- مقدمه:

پرتو گاما، به عنوان یکی از پرنرژژی ترین پرتوها، به طور گسترده در پزشکی، صنعت، نیروگاه‌های هسته‌ای، کشاورزی و تحقیقات به دلیل مزایای قابل توجهی مانند تصویربرداری پزشکی، درمان سرطان، نگهداری مواد غذایی و فرآیندهای استریلیزاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، انرژی بالای آن خطراتی برای سلامت انسان به همراه دارد، از جمله ایجاد سرطان و جهش‌های ژنتیکی، که ضرورت استفاده از حفاظ‌های مؤثر برای کاهش مواجهه را ایجاد می‌کند. مواد متراکم با عدد اتمی بالا برای حفاظت پرتوی بسیار مهم هستند و خواص تضعیف بهتری از جمله ضرایب تضعیف خطی بالاتر و لایه‌های نیمه‌کاهشی، ده کاهشی و مسیر آزاد میانگین پایین‌تر ارائه می‌دهند. اخیراً، مواد در مقیاس نانو به دلیل عملکرد حفاظتی برتر نسبت به مواد حجیم، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱-۳]. نانومواد که حاوی یون‌های عناصر خاکی کمیاب هستند، به دلیل پایداری بالا در برابر انرژی تابشی، طیف انتشار باریک و طول عمر لومینسانس طولانی شناخته شده‌اند. نانوبلورهای اکسید ساماریم با طراحی دقیق، پتانسیل بالایی برای کاربردهای پیشرفته در حسگرهای بیوشیمیایی، دستگاه‌های نانو الکترونیک، آشکارسازهای گاز و سامانه‌های فتوولتائیک دارند. اکسید ساماریم (Sm_2O_3) به دلیل کاربردهای گسترده در فناوری‌های فتوولتائیک، کاتالیزورها و دستگاه‌های اپتوالکترونیک اهمیت بالایی دارد. همچنین، مقطع جذب نوترون قابل توجه این ماده (۵۹۲۲ برن) و انتشار پرتوهای گامای ثانویه کم انرژی، توجه محققان را به خود جلب کرده است. در مطالعات پیشین، از Sm_2O_3 برای کاهش نوترون و گاما در کاربردهایی مانند پلیمرها، شیشه‌ها، سیمان، سبدهای ذخیره سوخت مصرف‌شده و راکتورهای هسته‌ای استفاده شده که عملکرد بهینه‌ای نشان داده است [۴، ۵]. همچنین، یون Y^{3+} به دلیل خواص مشابه با لانتانیدها، در تحقیقات حفاظتی کاربرد محدودی داشته است. مدل‌های محاسباتی می‌توانند ابزار مؤثری برای طراحی و ارزیابی سیستم‌ها، به ویژه در شرایطی که آزمایش‌های فیزیکی چالش برانگیز یا پرهزینه هستند، ارائه دهند [۶]. GEANT ϵ ، یک چارچوب شبیه‌سازی چندمنظوره است که در سال ۱۹۹۸ در سرن توسعه یافت و از اصول برنامه‌نویسی شیء‌گرا استفاده می‌کند. این ابزار با تکنیک مونت کارلو، حرکت ذرات در مواد را شبیه‌سازی می‌کند و شامل کتابخانه‌هایی به زبان ++C برای کاربردهایی همچون فیزیک انرژی بالا و شبیه‌سازی تابش فضایی است. GEANT ϵ با پوشش گسترده‌ای از انرژی از eV تا PeV، امکان تعریف هندسه‌های قابل تنظیم، مدل‌سازی دقیق رفتار ذرات، و استخراج نتایج شبیه‌سازی را فراهم می‌آورد [۷، ۸]. خطیبانی و همکاران خواص حفاظتی پرتوی کامپوزیت‌های Sm_2O_3



خالص و Sm_2O_3 گرافن را با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی GEANT^4 ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن گرافن باعث بهبود پارامترهای حفاظتی مانند LAC، MAC و راندمان حفاظت پرتوی (RPE) شده و عملکرد کلی کامپوزیت نسبت به Sm_2O_3 خالص را ارتقا داده است [۹]. مطالعه سعودی و همکاران نشان داد که افزایش محتوای Sm_2O_3 در ساختار شیشه ای که شامل $\text{Ti}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--B}_2\text{O}_3\text{--Sm}_2\text{O}_3$ موجب بهبود ضریب تضعیف جرمی و کاهش مقادیر میانگین مسیر آزاد، لایه نیمه‌کاهشی، و لایه یک‌دهم‌کاهشی می‌شود. این نتایج اثربخشی Sm_2O_3 در بهبود خواص حفاظتی پرتوی را برجسته می‌کند [۱۰]. در این پژوهش، نانوذرات Sm_2O_3 و Sm_2O_3 دوپ شده با ایتیریم با استفاده از روش سل-ژل سنتز شدند و خواص ساختاری و حفاظتی پرتوی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای کلیدی مانند MAC، MFP و HVL به صورت تجربی و با استفاده از شبیه‌سازی GEANT^4 ارزیابی شدند. نتایج نشان‌دهنده ارتباط قوی میان داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده بوده و بر اهمیت این پژوهش در ترکیب این رویکردها برای مطالعات حفاظتی پرتوی تأکید دارد.

۲- روش کار:

۲-۱- بخش سنتز ماده

سه بشر با استفاده از مایع دستشویی و اتانول تمیز شدند. نیترات هگزا هیدرات ساماریم (III) برای نمونه خالص (SY^0) در اتانول حل شد، در حالی که نمونه‌های دوپ شده با ایتیریم (SY^1 و SY^2) با مخلوط کردن مقادیر مشخصی از نیترات هگزا هیدرات ایتیریم (III) در اتانول تهیه شدند. این محلول‌ها به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شدند. در نهایت، نمونه‌ها در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت بازپخت شدند و به دمای اتاق سرد شدند. پودرهای حاصل با استفاده از یک پمپ هیدرولیکی به شکل قرص درآمدند.

۲-۲- بخش تجربی و پارامترهای حفاظت پرتوی

نانومواد به صورت قرص ساخته شدند و در فاصله ۲۰ میلی‌متری بین یک چشمه ایزوتوپیک سزیم ۱۳۷ با اکتیویته ۸.۷ میکروکوری و آشکارساز گایگر-مولر قرار گرفتند. برای کاهش خطا، آزمایش‌ها برای هر ماده به مدت ۵ دقیقه و در ۵ تکرار انجام شدند.

ضریب تضعیف خطی (LAC) به عنوان معیاری برای سنجش توانایی یک ماده جاذب در حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای استفاده می‌شود. مقدار این ضریب با استفاده از معادله بیر-لامبرت (Beer-Lambert) محاسبه می‌گردد [۱۱]:

$$\mu = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) / x \quad (1)$$

در اینجا، x نشان‌دهنده ضخامت نمونه بوده و I_0 و I به ترتیب تعداد فوتون‌های شمارش شده با حضور و بدون حضور نمونه را نشان می‌دهند. ضریب تضعیف جرمی (MAC) معیاری برای ارزیابی قابلیت جذب یک ماده است و از تقسیم ضریب تضعیف خطی بر چگالی ماده جاذب محاسبه می‌شود. در این پژوهش، مقادیر MAC با استفاده از رابطه زیر تعیین شده‌اند [۱۱]:

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (2)$$

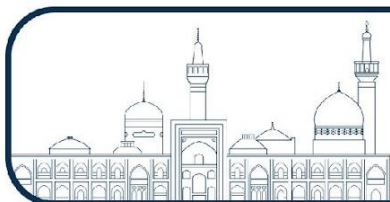
در این معادله، w_i نمایانگر کسر وزنی و $(\mu/\rho)_i$ ضریب تضعیف جرمی مربوط به هر عنصر موجود در ترکیب است. میانگین مسیر آزاد (MFP) به مسافت میانگینی اشاره دارد که یک الکترون پیش از وقوع تعامل با ماده در یک نمونه مشخص طی می‌کند [۱۱]:

$$MFP = 1/\mu \quad (3)$$

لایه نیمه‌کاهشی به عنوان ضخامت ماده جاذبی تعریف می‌شود که شدت پرتو تابشی را به نصف مقدار اولیه آن، پیش از عبور از ماده، کاهش می‌دهد. این مقدار از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۱]:

$$HLV = \ln 2 / \mu \quad (4)$$

لایه یک‌دهم‌کاهشی (TVL) به میزان ضخامت ماده جاذب اشاره دارد که برای کاهش شدت پرتو گامای تابشی به یک‌دهم مقدار اولیه آن در یک انرژی مشخص ضروری است [۱۱]:



$$TVL = \ln 10 / \mu \quad (5)$$

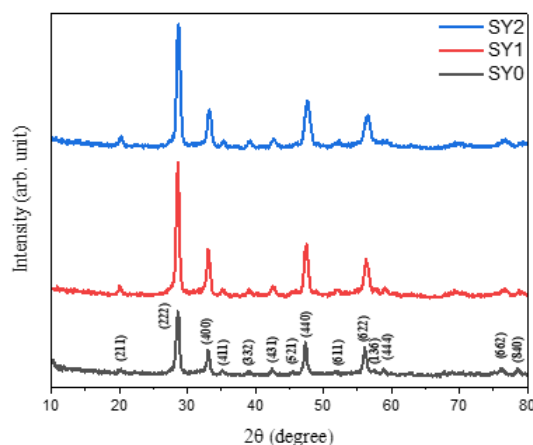
۳-۲- بخش شبیه سازی

در این مطالعه، از کد مونت کارلوی GEANT^۴ برای شبیه‌سازی ویژگی‌های حفاظتی استفاده شد. GEANT^۴ این امکان را فراهم می‌کند که عبور ذرات از مواد مختلف، همراه با مدل‌های فیزیکی، ردیابی، تصویرسازی و مدیریت هندسه، شبیه‌سازی شود. این کد قادر است شرایط آزمایشگاهی واقعی را با دامنه انرژی از ۱ الکترون‌ولت تا ترا الکترون‌ولت شبیه‌سازی کند. GEANT^۴ که با استفاده از برنامه‌نویسی شی‌گرا در زبان C++ توسعه یافته است، در حوزه‌های فیزیک پزشکی، هسته‌ای، ذرات، طراحی شتاب‌دهنده‌ها و مهندسی فضایی کاربرد دارد. در این مطالعه، ابتدا یک چشمه ایزوتروپیک Cs-۱۳۷ با انرژی گامای ۰.۶۶۲ مگاالکترون‌ولت، نمونه‌های اکسید ساماریوم خالص و اکسید ساماریوم دوپ شده با ایتیم و آشکارساز گایگر-مولر با هندسه مشخص تعریف شدند. فاصله بین چشمه و نمونه و همچنین فاصله بین نمونه و آشکارساز به ترتیب ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این چشمه به‌گونه‌ای پیکربندی شده که پرتوهای گاما به‌صورت یکنواخت و کولیمیت شده از دهانه کولیماتور خارج می‌شوند، تا شرایط تجربی با دقت بازتولید شود. آشکارسازی تابش‌ها در این مطالعه صرفاً در انرژی تک‌فوتونی ۰.۶۶۲ مگاالکترون‌ولت، که مربوط به پرتو گاما اصلی چشمه Cs-۱۳۷ است، انجام شده است. سپس با تعیین ۱۰ میلیون ذره، تعداد ذراتی که به آشکارساز رسیدند به‌عنوان نتیجه شبیه‌سازی ثبت شد. استخراج خروجی‌ها با استفاده از کلاس‌های اختیاری GEANT^۴، به‌ویژه G^۴RunManager و G^۴Step، برای ردیابی ذرات و ثبت تعداد فوتون‌های رسیده به آشکارساز انجام شده است. در این مطالعه، شبیه‌سازی نانوذرات اکسید ساماریوم دوپ شده با ایتیم بر اساس درصد‌های وزنی (۱۰٪ و ۲۰٪)، همان‌طور که در بخش سنتز ماده ذکر شده، انجام شده و این مقادیر به‌طور مستقیم در تعریف ترکیب شیمیایی مواد در GEANT^۴ وارد شده‌اند. از این‌رو، مدل‌سازی بر اساس خواص میانگین ماده در ابعاد قرص صورت گرفته و فرض شده که نانوذرات به‌صورت یکنواخت در ساختار قرص توزیع شده‌اند.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- نتایج آنالیز XRD

شکل ۱ داده‌های XRD نمونه‌های مبتنی بر اکسید ساماریوم را نشان می‌دهد. شاخص‌های hkl (شاخص میلر) خطوط پراش برچسب‌گذاری شده‌اند. تطابق مناسبی بین نمونه‌ها و Sm_2O_3 استاندارد مشاهده می‌شود. یک اکسید ساماریوم پلی‌کریستالی مکعبی استاندارد (گروه فضایی: $I\bar{2}3$) با کد ۰۱۵۳-۰۷۶-۰۱ انطباق خوبی با نمونه‌ها نشان می‌دهد. هیچ آلودگی خاصی در الگوهای XRD مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده خلوص مناسب آن‌هاست. با این حال، با افزایش زمان هیدروترمال، شدت نسبی قله‌ها افزایش یافته است که ممکن است نشان‌دهنده بهبود بلورینگی باشد. برای قله اصلی، ثابت‌های شبکه محاسبه شده و در کنار ثابت‌های شبکه استاندارد (جدول ۱) قرار داده شده‌اند. این مقادیر به دلیل تغییرات در افزودن ایتیم تغییر کرده‌اند. با افزایش آلایش به ۱۰٪، مقادیر پارامترها به مقادیر استاندارد نزدیک‌تر شده‌اند هرچند که انحراف از مقادیر استاندارد هم مشاهده می‌شود، به عنوان مثال در حجم سلول واحد که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های یونی و ناپایداری شبکه باشد. دلایل دیگری مانند تغییر زاویه پیوند، طول پیوند و پیچش ساختار اصلی نیز احتمالاً در این انحراف نقش دارند [۱۲]. همچنین، مشخص است که انواع مختلفی از نقص‌ها در داخل ساختار اصلی باعث فرآیند تغییرات لبه باند می‌شوند.



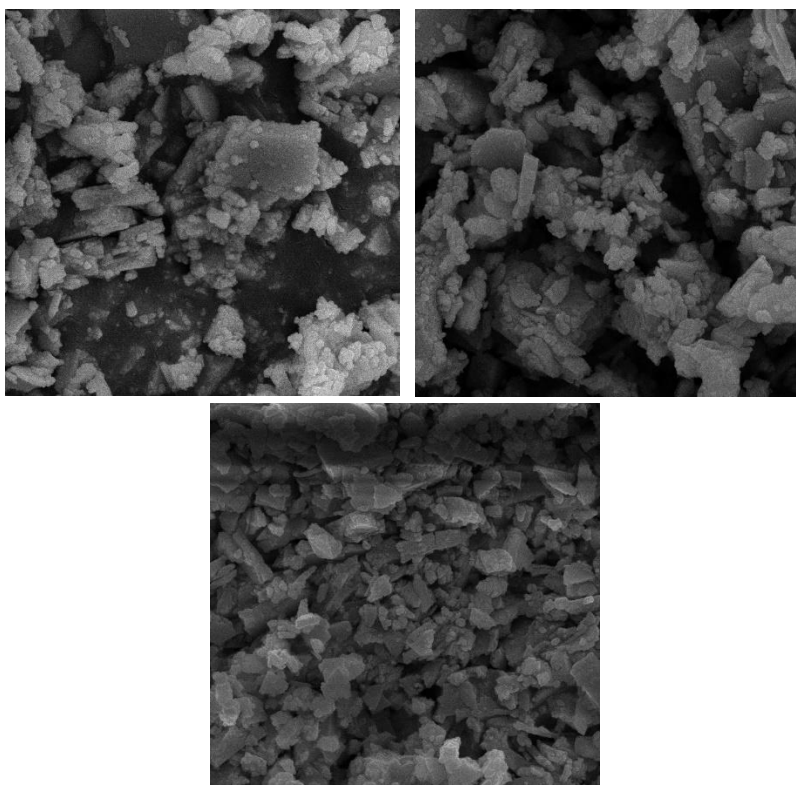
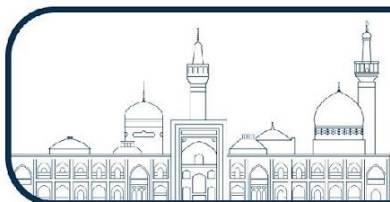
شکل (۱) نتایج پراش XRD نمونه‌های مبتنی بر اکسید ساماریوم

جدول ۱: پارامترهای شبکه برای بالاترین شدت قله پراش

Sample	d (Å)		a = b = c (Å)		Volume of unit cell (Å) ³	
	Cal.	Sta.	Cal.	Sta.	Cal.	Sta.
SY ^۰	۳.۱۰۸۵	۳.۱۳۲۱	۱۰.۷۶۸۰	۱۰.۸۵۰۰	۱۲۴۸.۵۶	۱۲۷۷.۲۹
SY ^۱	۳.۱۱۸۴	۳.۱۳۲۱	۱۰.۸۰۲۲	۱۰.۸۵۰۰	۱۲۶۰.۵۰	۱۲۷۷.۲۹
SY ^۲	۳.۱۰۵۸	۳.۱۳۲۱	۱۰.۷۵۸۸	۱۰.۸۵۰۰	۱۲۴۵.۳۷	۱۲۷۷.۲۹

۳-۲- نتایج آنالیز FESEM

در شکل ۲، الف، ب، پ به ترتیب ساماریوم خالص، ساماریوم با دوپ ده درصد ایتیریم و ساماریوم با دوپ ۲۰ درصد ایتیریم با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ مشاهده می‌شود. تصویر feSEM مورفولوژی نامنظم را به ما نشان می‌دهد. ساماریوم با دوپ ۱۰ درصد ایتیریم به ساختار و مورفولوژی ماده قوت بخشیده و اندازه ذرات را افزایش داده است. ساماریوم با دوپ ۲۰ درصد حتی فاصله بین ذرات را کم کرده و سطح یکپارچه از ماده را می‌بینیم که تراکم ماده را به وضوح نشان می‌دهد. می‌توان پی برد که افزایش اندازه ذرات نسبت به نمونه خالص نتیجه ی مطلوب تری به ما می‌دهد. اما در تصویر پ اندازه ذرات کوچکتر با پاسخ بهتر را داریم با این تفاوت که فاصله بین ذرات به حداقل رسیده و تراکم بالای ماده را شاهد هستیم که نشان می‌دهد کاهش فاصله بین ذرات و اندازه ریز تر اما پرتراکم تر ذرات نتیجه مطلوب تری به ما می‌دهد. ایتیریم با قرار گیری در بین ساختار ساماریوم در شکل ب اندازه ذرات را بزرگتر کرده و در شکل پ با زیادتیر شدن مقدار ایتیریم در ساختار ساماریوم این فاصله را کاهش داده و سطح یکپارچه تری به ما می‌دهد.



(پ)

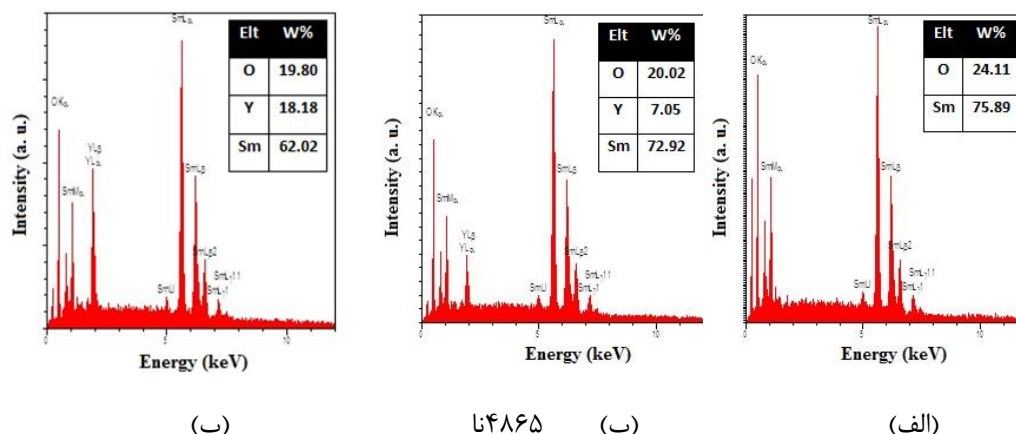
(ب)

(الف)

شکل (۲) تصاویر FESEM از اکسیدساماریوم (الف)، اکسیدساماریوم دوپ شده ۱۰ درصد ایتريوم (ب) و اکسیدساماریوم دوپ شده با ۲۰ درصد ایتريوم (پ)

۳-۳- نتایج آنالیز EDX

جهت بررسی ترکیب عنصری نانومواد تهیه شده، از تحلیل EDX استفاده شده است. طیف مشخصه EDX در شکل ۳ نشان داده شده و داده‌های تحلیلی در جدول ارائه شده‌اند. بر اساس جدول ارائه شده، هیچ اثری از ناخالصی‌ها و عناصر دیگر مشاهده نمی‌شود. در طیف SY^0 ، هشت قله دیده می‌شود که به ساماریوم و اکسیژن نسبت داده شده‌اند. با این حال، در طیف SY^1 و SY^2 ، ده قله مشاهده می‌شود که شامل ساماریوم، اکسیژن و ایتريوم هستند و این موضوع می‌تواند تأییدی بر حضور موثر آلاییدگی ایتريوم باشد.



شکل (۳) داده‌های EDX نمونه‌های SY^0 (الف)، SY^1 (ب) و SY^2 (پ)

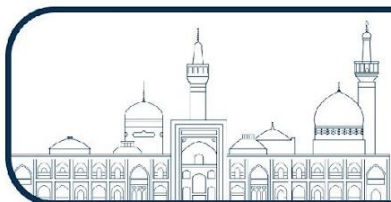
۳-۴- نتایج تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۲ نتایج مربوط به MFP ، HVL ، LAC ، MAC و TVL را برای نانوذرات خالص اکسید ساماریوم و نانوذرات اکسید ساماریوم دوپ شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ ایتريوم ارائه می‌دهد.

Sample	LAC (cm^{-1})	MAC (cm^2/g)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)
SY^0	۲.۱۰۷۰	۰.۲۸۳۹	۰.۴۷۷۶	۰.۳۲۸۹	۱.۰۹۲۸
SY^1	۲.۱۶۲۲	۰.۲۹۴۲	۰.۴۶۲۴	۰.۳۲۰۵	۱.۰۶۴۹
SY^2	۲.۲۰۵۸	۰.۲۹۶۵	۰.۴۵۳۳	۰.۳۱۴۲	۱.۰۴۳۸

جدول ۲: نتایج پارامترهای حفاظت از تابش برای SY^0 ، SY^1 و SY^2

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که با افزایش میزان ایتريوم، مقادیر LAC و MAC افزایش یافته و مقادیر MFP ، HVL و TVL کاهش می‌یابد. در نتیجه، با افزایش ایتريوم، تعداد فوتون‌های رسیده به آشکارساز کاهش می‌یابد و نمونه SY^2 به عنوان حفاظ بهتری نسبت به دیگر نمونه‌ها عمل می‌کند. این تفاوت‌ها عمدتاً به تغییرات در خواص ساختاری و فیزیکی-شیمیایی ماده در اثر دوپ مرتبط است. دوپ با عناصر با عدد اتمی بالاتر موجب افزایش عدد اتمی مؤثر و جذب بهتر پرتوهای گاما و ایکس می‌شود. دوپ معمولاً چگالی ماده را افزایش داده و تراکم اتمی بیشتر، احتمال تعامل فوتون‌ها با ماده را افزایش می‌دهد. همچنین، دوپ می‌تواند عیوبی در شبکه کریستالی ایجاد کرده یا ترکیبات شیمیایی جدیدی با خواص جذب بهتر و ساختار متراکم‌تر تشکیل دهد که منجر به افزایش جذب پرتو می‌شود. افزون بر این، دوپ ممکن است الکترون‌های اضافی وارد ماده کند که تعامل با پرتوهای ورودی را افزایش داده و جذب پرتو را بهبود می‌بخشد [۱۳-۱۵]. نتایج شبیه‌سازی با کد مونت کارلو ($GEANT^4$) برای پارامترهای LAC ، MAC ، MFP ، HVL ، RPE و TVL مربوط به نانوذرات خالص Sm_2O_3 و نانوذرات Sm_2O_3



دوپ شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ ایتريوم در جدول ۳ ارائه شده است. در کد شبیه‌سازی GEANT^۴، شرایط آزمایشی با دقت بازتولید شده و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تفاوت بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده حداقل بوده است. با توجه به اینکه کد شبیه‌سازی GEANT^۴ ابزاری معتبر و تأیید شده است، نتایج خروجی آن قابل اعتماد بوده و با اطمینان گزارش می‌شود.

جدول ۳: نتایج پارامترهای حفاظتی تابش نمونه های SY^۰، SY^۱ و SY^۲ مرتبط با داده‌های شبیه‌سازی شده

Sample	LAC (cm ^{-۱})	MAC (cm ^۲ /g)	MFP (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)
SY ^۰	۱.۹۸۱	۰.۲۶۷۰	۰.۵۰۴۷	۰.۳۴۹۸	۱.۱۶۲۳
SY ^۱	۱.۹۹۶	۰.۲۷۱۶	۰.۵۰۱۰	۰.۳۴۷۲	۱.۱۵۳۵
SY ^۲	۲.۰۰۸	۰.۲۶۹۹	۰.۴۹۸۰	۰.۳۴۵۱	۱.۱۴۶۷

جدول ۴ درصد تضعیف فوتون های گاما توسط نمونه ها به صورت تجربی و شبیه سازی نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که انحراف‌ها عمدتاً کمتر از ۵٪ بوده و این امر دقت بالای شبیه‌سازی GEANT^۴ را در بازتولید شرایط تجربی تأیید می‌کند.

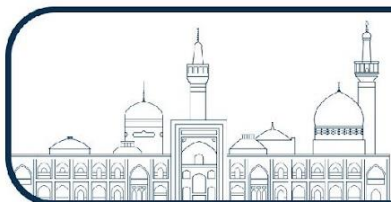
جدول ۴: درصد تضعیف فوتون های گاما توسط نمونه ها به صورت تجربی و شبیه سازی

Sample	Experimental (%)	Simulation (%)
SY ^۰	۲۵.۲۳	۲۳.۹۱
SY ^۱	۲۵.۷۹	۲۴.۰۷
SY ^۲	۲۶.۲۴	۲۴.۲

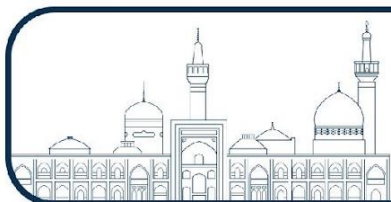
۴- نتیجه گیری:

در این پژوهش، نانوساختارهای اکسید ساماریوم خالص و دوپ شده با ایتريوم با استفاده از روش سل ژل سنتز شده و ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل XRD ماهیت پلی کریستالی نمونه‌ها و مشخصات ساختاری اکسید ساماریوم را تأیید کرد. از نظر مورفولوژی، نانومیل‌های اکسید ساماریوم با طول متوسط ۴۰۰ نانومتر و قطر ۸۰ نانومتر مشاهده شدند. افزودن گرافن منجر به توزیع نامنظم نانومیل‌ها در نانوکامپوزیت شد. پارامترهای حفاظتی تابش شامل LAC، MAC، HVL، TVL و MFP برای هر دو نمونه به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی محاسبه شدند که نتایج حاکی از همخوانی خوبی بین این داده‌ها بود. حضور ایتريوم باعث بهبود عملکرد حفاظتی شد و به‌طور میانگین، مقادیر LAC و MAC را افزایش و HVL و TVL را کاهش داد. به‌طور کلی، اکسید ساماریوم دوپ شده با ایتريوم پتانسیل بالایی به‌عنوان یک محافظ کارآمد در برابر تابش گاما از خود نشان داد.

۵- مراجع:



- [۱] A. H. Almuqrin, M. Rashad, C. V. More, M. Sayyed, and M. Elsafi, "An experimental and theoretical study to evaluate $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--PbO--B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--BaO}$ radiation shielding properties," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۲۲۲, p. ۱۱۱۸۲۴, ۲۰۲۴.
- [۲] Z. Alrowaili and M. Al-Buriah, "Gamma absorption/scattering parameters and nuclear radiation shielding performance of AlSN--Zr glass system: Potential use in medical facilities," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۲۲۷, p. ۱۱۲۳۶۷, ۲۰۲۵.
- [۳] P. Sopapan, J. Laopaiboon, O. Jaiboon, C. Yenchai, and R. Laopaiboon, "Feasibility study of recycled CRT glass on elastic and radiation shielding properties used as x-ray and gamma-ray shielding materials," *Progress in Nuclear Energy*, vol. ۱۱۹, p. ۱۰۳۱۴۹, ۲۰۲۰.
- [۴] Z. K. Heiba and M. B. Mohamed, "Effect of gamma radiation on structural and optical parameters of $\text{Sm}^{2+}\text{O}^{2-}:\text{Mn}/\text{PVA}$ nanocomposite film," *Optical and Quantum Electronics*, vol. ۵۲, pp. ۱-۱۴, ۲۰۲۰.
- [۵] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities," *Arabian journal of chemistry*, vol. ۱۲, no. ۷, pp. ۹۰۸-۹۳۱, ۲۰۱۹.
- [۶] A. Khodaei, A. N. Z. Rashed, F. Moradi, H. A. Abdul-Rashid, and D. Bradley, "A review of the Geant4 simulation platform for applications involving optical-based sensing and dosimetry," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۲۱۲, p. ۱۱۱۰۶۲, ۲۰۲۳.
- [۷] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۸] F. Moradi, K. R. E. Saraee, S. A. Sani, and D. Bradley, "Metallic nanoparticle radiosensitization: The role of Monte Carlo simulations towards progress," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۱۸۰, p. ۱۰۹۲۹۴, ۲۰۲۱.
- [۹] A. B. Khatibani, A. R. Khoshhal, E. B. Tochaee, S. R. Jamnani, and H. M. Moghaddam, "Physical and gamma radiation shielding features of $\text{Sm}^{2+}\text{O}^{2-}$ /graphene nanoparticles: A comparison between experimental and simulated gamma shielding capability," *Inorganic Chemistry Communications*, p. ۱۱۲۷۷۲, ۲۰۲۴.
- [۱۰] H. A. Saudi, H. O. Tekin, H. M. Zakaly, S. A. Issa, G. Susoy, and M. Zhukovsky, "The impact of samarium (III) oxide on structural, optical and radiation shielding properties of thallium-borate glasses: Experimental and numerical investigation," *Optical Materials*, vol. ۱۱۴, p. ۱۱۰۹۴۸, ۲۰۲۱.
- [۱۱] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of $\text{ZnCo}^{2+}\text{O}^{4-}$ and $\text{ZnCo}^{2+}\text{O}^{4-}$ /graphene nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.
- [۱۲] A. Bagheri Khatibani and A. Shabankhah, "Fabrication and ethanol sensing of sol-gel grown zinc oxide powder: the effect of cobalt and copper doping," *Applied Physics A*, vol. ۱۲۷, no. ۵, p. ۳۰۸, ۲۰۲۱.
- [۱۳] D. G. Byalollikar, S. Biradar, A. Dinkar, T. Sankarappa, and J. Biradar, "Impact of bismuth oxide on structural, optical and gamma-ray shielding properties of calcium-sodium-borate glasses," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. ۲, no. ۱۱-۱۲, pp. ۱۲۰۷-۱۲۱۵, ۲۰۲۴.
- [۱۴] S. A. Issa, M. Sayyed, A. Mostafa, G. Lakshminarayana, and I. Kityk, "Investigation of mechanical and radiation shielding features of heavy metal oxide based phosphate glasses for gamma radiation attenuation applications," *Journal of Materials Science*:



تحلیل شدت فوتون‌های نوری در آشکارسازهای سوسوزن تحت تابش پرتوهای گاما: مطالعه‌ای

مبتنی بر ابزار شبیه‌سازی GEANT4 (کد مقاله : ۱۲۷۳)

خوشحال، امیررضا^۱ - اسماعیلی ترشابی، احمد^۱ - بابامحمدی، شراره^۱

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،

کرمان، ایران

چکیده:

امروزه آشکارسازهای سوسوزن بخاطر مزایای قابل توجه، کاربردهای وسیعی در حوزه های مختلف کاربرد پرتوها از صنعت تا پزشکی را دارند. اساس تولید سیگنال در این آشکارسازها نور مرئی تولید شده در حجم حساس آنها می باشد که این نور در مرحله بعد توسط فوتودیودها منجر به تولید سیگنال نهایی می گردد. در این تحقیق به ارزیابی خصوصیات فیزیکی فرایند تولید نور مرئی در آشکارساز سوسوزن $NaI(Tl)$ در طیفی از انرژی‌های رایج پرتوهای گاما به جهت بررسی و افزایش دقت آشکارساز سوسوزن در برابر چشمه های مختلف پرداخته شده است. به جهت این منظور از ابزار شبیه ساز $GEANT4$ برای شبیه سازی آشکارساز سوسوزن $NaI(Tl)$ در مقابل پرتوهای گاما منابع رادیواکتیو ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{109}Cd با انرژی‌های به ترتیب MeV $1.17 \square 1.33$ و $(0.662) KeV$ (۲۵،۲۲،۱،۸۳،۰۶،۳،۱۰) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق تعداد فوتون‌های نوری به ازای هر ذره برای ^{60}Co برابر با ۲۵۳۶۲،۴ برای ^{137}Cs برابر با ۱۶۳۰۲،۹ و برای ^{109}Cd برابر با ۴۸۵،۰۷۶ به دست آمد خطای نتایج کمتر از ۱ درصد می باشد. در حوزه پزشکی هسته‌ای، درک دقیق تعامل فوتون‌های گاما با مواد سوسوزن برای بازسازی تصاویر دقیق و کاهش نویز اهمیت دارد، به ویژه در تشخیص زودهنگام سرطان. این مطالعه می‌تواند به توسعه آشکارسازهای حساس و دقیق‌تر، انتخاب مواد سوسوزن مناسب و بهینه‌سازی هندسه آشکارساز کمک کند. همچنین، این تحقیق به بهبود اندازه‌گیری انرژی پرتوهای گاما در آزمایشات ذرات بنیادی کمک کرده و دقت نتایج را افزایش می‌دهد. این پیشرفت‌ها به ارتقاء عملکرد آشکارسازها و بهبود تشخیص در پزشکی و تحقیقات پرتوی می‌انجامد.

کلمات کلیدی: ^{109}Cd ، ^{137}Cs ، ^{60}Co ، کد شبیه سازی $GEANT4$ ، آشکارساز سوسوزن

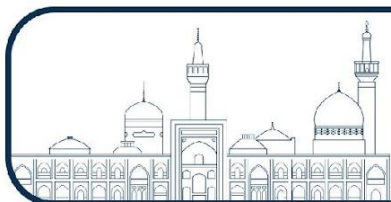
Investigation of Optical Photon Intensity Produced in Scintillation Detectors Under Gamma-Ray Radiation at Different Energies: A Simulation Study

Khoshhal, Amir Reza^{۱*}, Esmaili Torshabi, Ahmad^۱, Babamohammadi, Sharareh^۱

۱. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

Today, scintillation detectors are widely used in various fields due to their significant advantages, ranging from industry to medicine. The principle of signal production in these detectors is based on the visible light emitted within their sensitive volume, which is subsequently detected and amplified by photodiodes or photomultiplier tubes to generate the final signal. In this study, the physical characteristics of the visible light production process in a $NaI(Tl)$ scintillation detector were evaluated across a range of common gamma-ray energies

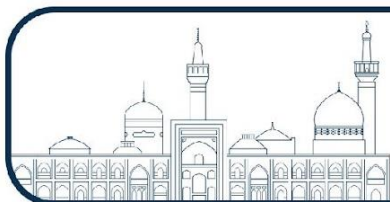


to assess and enhance the detection accuracy of the scintillation detector against various radiation sources. For this purpose, the GEANT⁴ simulation code was used to simulate the NaI (Tl) scintillation detector's response to gamma rays from radioactive sources ^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{109}Cd , with energies of (1.17 MeV, 1.32 MeV), (0.662 keV), and (3.10 keV, 22.1 keV, 20 keV, 83.06 keV), respectively. The results of this study show that the number of optical photons produced per particle was 25,362.4 for ^{60}Co , 16,302.9 for ^{137}Cs , and 485,076 for ^{109}Cd . The error in the results is less than 1%. In the field of nuclear medicine, a precise understanding of the interaction between gamma photons and scintillation materials is crucial for accurate image reconstruction and noise reduction, especially in the early detection of diseases like cancer. This study can contribute to the development of more sensitive and precise detectors, the selection of appropriate scintillation materials, and the optimization of detector geometry. Furthermore, it aids in improving gamma-ray energy measurements in particle physics experiments, enhancing the accuracy of results. These advancements lead to the enhancement of detector performance and improved diagnostics in both medical imaging and radiation research.

Key words: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{109}Cd , GEANT⁴ simulation code, scintillation detector

۱- مقدمه:

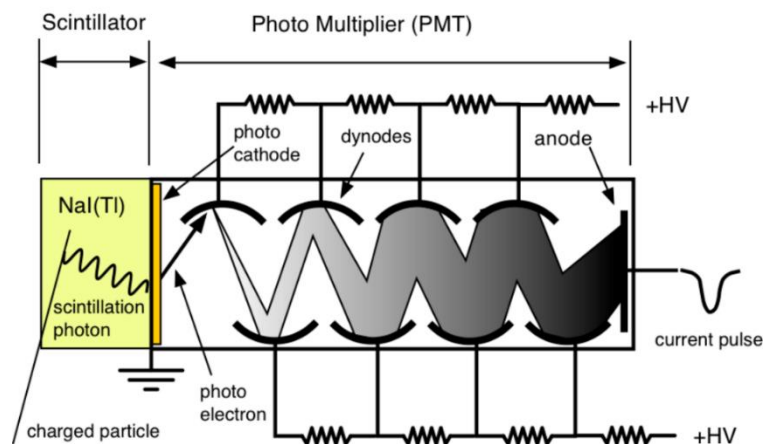
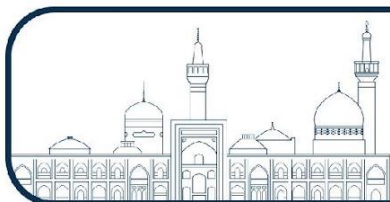
آشکارسازهای سوسوزن به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در سیستم‌های آشکارسازی تابش شناخته می‌شوند و به دلیل حساسیت بالا، بازده کوانتومی مناسب و قابلیت تفکیک انرژی بالا، در علوم هسته‌ای و پزشکی کاربردهای فراوانی دارند [۱]. در فرآیند برخورد پرتوهای گاما با ماده سوسوزن، انرژی تابشی جذب‌شده به فوتون‌های نوری تبدیل می‌شود [۲]. مطالعه ارتباط بین انرژی پرتوهای گاما و شدت فوتون‌های نوری تولیدشده اهمیت بالایی دارد، زیرا این داده‌ها می‌توانند به بهبود عملکرد آشکارسازها در کاربردهای متنوع کمک کنند [۳، ۴]. آشکارساز NaI(Tl) به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند حساسیت بالا به تابش گاما، بازدهی نوری مناسب و هزینه نسبتاً پایین، به‌طور گسترده در بسیاری از کاربردهای تجربی و شبیه‌سازی‌های تابش گاما استفاده می‌شود. همچنین در مقایسه با آشکارسازهای دیگر مانند CsI(Tl) و Ge(Li) دارای مزایای قابل توجهی از جمله بازدهی خوب، هزینه پایین و سهولت استفاده در شرایط آزمایشگاهی است. در مطالعه‌ای که توسط A. Schleife و همکارانش در سال ۲۰۱۶ صورت گرفت به بررسی دقیق خواص نوری چهار ماده‌ی سوسوزن پرکاربرد، یعنی یدید سدیم (NaI)، برمید لانتانیم ($^3\text{LaBr}$)، یدید باریوم (^2BaI) و یدید استرانسیم (^2SrI) پرداخته شد. این بررسی، درک عمیق‌تری از خواص نوری این مواد فراهم کرده است [۵]. آشکارسازهای سوسوزن، به ویژه سدیم یدید اکتیو شده با تالیم NaI(Tl)، نقش حیاتی در فناوری‌های تشخیص پرتو ایفا می‌کنند [۶]. در آشکارسازهای NaI(Tl)، انرژی پرتوهای گاما یا ایکس به فوتون‌های نور تبدیل شده و این فوتون‌ها توسط لوله‌های تکثیرکننده نوری (فوتوتیوب‌ها) شناسایی می‌شوند [۷]. در مطالعه دیگری از آشکارسازهای NaI(Tl)، استفاده از روش‌های خاص پردازش داده و یک الگوریتم بهینه‌سازی، نشان داده شد که می‌توان دقت اندازه‌گیری دز توسط آشکارسازهای NaI(Tl) را، به خصوص در انرژی‌های پایین تابش، بهبود بخشید [۸]. مطالعه دیگری در رابطه با مقایسه آشکارسازهای سوسوزن و آشکارسازهای پرشده با گاز برای بررسی آلودگی که در دومین کنگره IRPA اروپا در مورد حفاظت در برابر تابش در فرانسه ارائه شد که در آن به مقایسه دو نوع اصلی از آشکارسازهای سوسوزن و آشکارسازهای پرشده با گاز مورد استفاده برای پایش آلودگی رادیواکتیو پرداخته شد [۹]. همچنین Meo و همکاران در سال (۲۰۰۹) از GEANT⁴ برای شبیه‌سازی فوتون‌های نوری در آشکارسازهای سوسوزن SPECT استفاده کردند و انتقال نور را درون سوسوزن‌ها، لوله‌های



تکثیرکننده نوری و دستگاه‌های کوپلینگ (اتصال‌دهنده) مطالعه کردند [۱۰]. نرم‌افزار ۴GEANT برای مطالعه‌ی عوامل گوناگون مؤثر بر جمع‌آوری نور در سوسوزن‌های پلاستیکی، مانند ابعاد، محل قرارگیری و نوع پرداخت سطح لوله‌های تکثیرکننده نوری (PMT) به کار رفته است [۱۱]. کد شبیه‌سازی جینت، امکان بهینه‌سازی طراحی آشکارسازها و موقعیت PMT لوله تکثیرکننده نوری را برای بهبود عملکرد فراهم می‌کند. ۴GEANT، که در زبان ++C و به صورت شیء‌گرا طراحی شده است، می‌تواند شرایط آزمایشگاهی را در بازه انرژی ۱ الکترون‌ولت تا ترا الکترون‌ولت شبیه‌سازی کند و در زمینه‌های فیزیک پزشکی، فیزیک هسته‌ای، طراحی شتاب‌دهنده‌ها و مهندسی فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲-۱۵]. ۴GEANT یک ابزار شبیه‌ساز چندمنظوره برای برهم‌کنش ذرات با ماده است که به طور گسترده در فیزیک انرژی بالا، فیزیک پزشکی و علوم فضایی استفاده می‌شود [۱۶]. طراحی شیء‌گرا و قابلیت‌های گسترده آن، این ابزار شبیه‌ساز را برای محیط‌های آزمایشی متنوع مناسب می‌سازد [۱۷]. قابلیت‌های این ابزار به طور مداوم گسترش یافته است، و پیشرفت‌های اخیر بر بهینه‌سازی عملکرد برای تنظیمات پیچیده، بهبود انتشار میدان و پیشرفت‌ها در هندسه، فرآیندهای فیزیکی و ویژگی‌های تعاملی متمرکز شده است [۱۸]. در این تحقیق با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلوی ۴GEANT به بررسی میزان تولید فوتون‌های نوری در آشکارساز سوسوزن (NaI(Tl) در برابر تابش پرتوهای گاما در انرژی‌های مختلف چشمه‌های سزیم-۱۳۷ با انرژی گامای ۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت و کبالت-۶۰ با دو پیک انرژی گامای ۱.۳۳ و ۱.۱۷ مگا الکترون‌ولت و کادمیم-۱۰۹ با ۴ پیک انرژی گاما ۳.۱۰، ۲۲.۱، ۲۵ و ۸۸.۰۳ کیلو الکترون‌ولت پرداخته شد. در حوزه تصویربرداری پزشکی، افزایش دقت و کاهش خطاهای اندازه‌گیری در آشکارسازهای سوسوزن نقشی کلیدی در بهبود کیفیت تصاویر تشخیصی ایفا می‌کند. این تحقیق با بررسی تعامل فوتون‌های گاما با مواد سوسوزن، می‌تواند به بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی آشکارسازها و افزایش حساسیت آن‌ها کمک کند. بهبود دقت در تشخیص ویژگی‌های بافتی و کاهش نویز تصویر می‌تواند به تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تر بیماری‌ها، به‌ویژه در مراحل اولیه سرطان، منجر شود. علاوه بر این، نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی نسل جدیدی از آشکارسازهای پزشکی، بهینه‌سازی روش‌های تصویربرداری هسته‌ای، و ارتقای عملکرد تجهیزات مورد استفاده در فیزیک پزشکی و تحقیقات پرتوی مؤثر باشد.

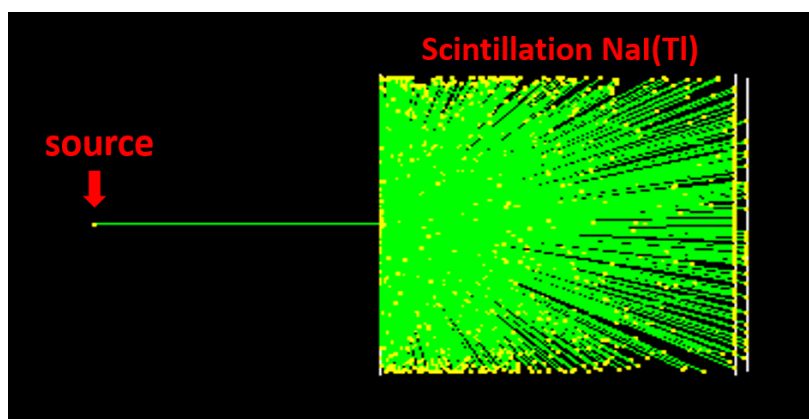
۲- روش کار:

در این مطالعه از نسخه ۱۱.۱.۳ کد شبیه‌سازی مونت کارلوی ۴GEANT و همچنین یک سیستم ۴ هسته‌ای با ۶ گیگ رم جهت کدنویسی و پردازش، با هدف بررسی میزان تولید فوتون‌های نوری در آشکارساز سوسوزن (NaI(Tl) در برابر تابش پرتوهای گاما در انرژی‌های مختلف استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیکی از اساس کار آشکارسازهای سوسوزن آورده شده است.



شکل ۱: شماتیکی از اساس کار آشکارسازهای سوسوزن [۱۳]

شماتیک قرار گیری چشمه های مختلف گاما و آشکارساز سوسوزن در شکل ۲ نشان داده شده است.

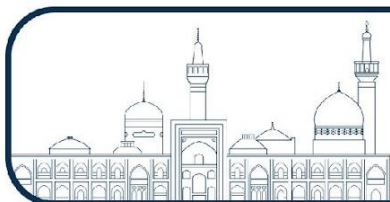


شکل ۲: شماتیک قرار گیری چشمه های مختلف گاما و آشکارساز سوسوزن

مشخصات آشکارساز شبیه سازی شده در جدول ۱ نشان داده شده است. مشخصات اپتیکی شامل ضریب شکست، طول جذب، بازده نوری و ضریب بازتابندگی در جدول ۲ آورده شده است. در این شبیه سازی، مقدار ثابت بریکس برابر با ۰.۱۲۶ میلی متر بر مگا الکترون ولت فرض شده است.

جدول (۱) مشخصات آشکارساز شبیه سازی شده

نوع آشکارساز	جنس آشکارساز	هندسه آشکارساز	ابعاد	جنس رفلکتور	ضخامت رفلکتور	جنس PMT	ضخامت PMT
سوسوزن	NaI (Tl)	استوانه	طول و قطر ۳ اینچ	مایلار	۲ mm	SiO _۲ ($\rho = ۲.۲ \frac{g}{cm^۳}$)	۵ mm



جدول (۲) ویژگی های اپتیکی آشکارساز ها [۳]

ضرب شکست NaI	ضرب شکست حجم جهانی	ضرب شکست مایلار	ضرب شکست PMT	طول جذب ۴۰۴BC (cm)	طول جذب NaI (cm)	ضرب رفلکتیویتی مایلار	بهره کوانتومی PMT
۱.۸۳۹	۱.۰۰	۱.۶۵۵	۱.۴۵۸۵	۱۴۰	۳۰	۹۸ %	۲۵ %

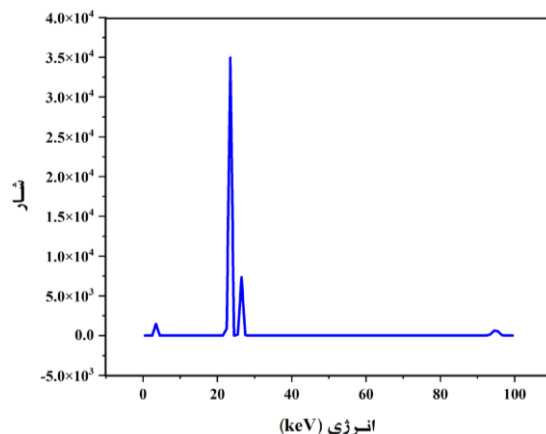
در این شبیه‌سازی از فیزیک‌های $G^4OpticalPhysics$ و $QGSP\_BIC$ ، $G^4EMStandardPhysics\_Option$ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، چشمه‌ها به صورت نقطه‌ای و کولیمیت‌شده در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از آشکارساز قرار گرفته‌اند. مشخصات چشمه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۹]. تعداد فوتون‌های اولیه برای این شبیه‌سازی معادل یک میلیون در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) مشخصات چشمه‌ها و انرژی گاما آنها

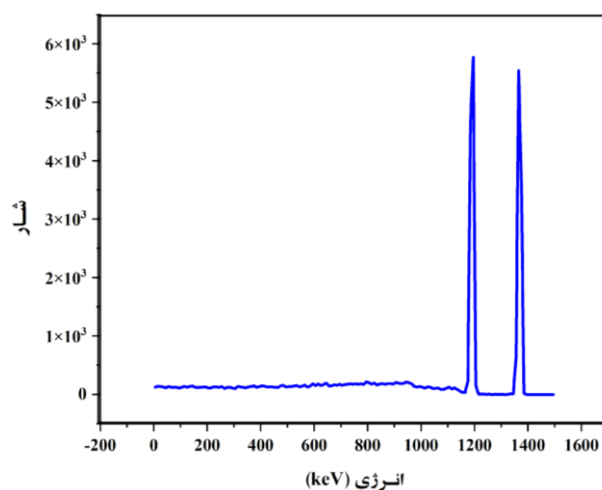
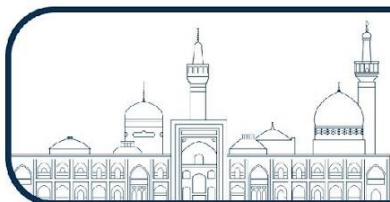
چشمه‌ها	سزیم ۱۳۷	کبالت ۶۰	کادمیم ۱۰۹
انرژی گاما	۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت	۱.۳۳ و ۱.۱۷ مگا الکترون‌ولت	۳.۱۰، ۲۲.۱، ۲۵.۰ و ۸۸.۰ کیلو الکترون‌ولت

۳- نتایج:

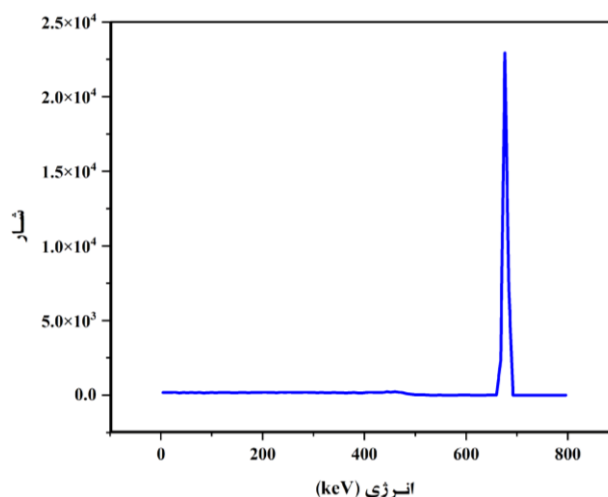
با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۳، ۴ و ۵، نمودار پیک های گاما در انرژی های مختلف چشمه های کادمیم-۱۰۹، کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در شکل ۳، ۴ و ۵ پیک های گاما در چشمه های مختلف نشان داده شده است. در جدول ۴ تعداد فوتون های نوری تولید شده در برابر تابش چشمه های سزیم-۱۳۷، کبالت-۶۰ و کادمیم-۱۰۹ نشان داده شده است. چشمه کادمیم-۱۰۹، ۴۸۵.۰۷۶ فوتون به ازای هر ذره، کبالت-۶۰، ۲۵۳۶۲.۴ فوتون به ازای هر ذره و سزیم-۱۳۷، ۱۶۳۰۲.۹ فوتون به ازای هر ذره تولید شده است. خطای نتایج کمتر از ۱ درصد می باشد.



شکل ۳: نمودار طیف انرژی گاماها ی چشمه کادمیم-۱۰۹



شکل ۴: نمودار طیف انرژی گاماهاى چشمه کبالت-۶۰



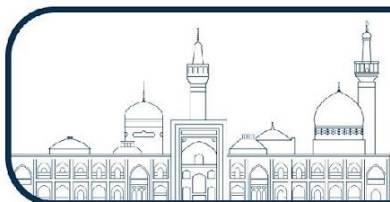
شکل ۵: نمودار طیف انرژی گاماهاى چشمه سزیم-۱۳۷

جدول (۴) تعداد فوتون های نوری تولید شده در تابش چشمه های مختلف (تعداد/ذره)

چشمه	Cd-۱۰۹	Co-۶۰	Cs-۱۳۷
تعداد فوتون های نوری	۴۸۵.۰۷۶	۲۵۳۶۲.۴	۱۶۳۰۲.۹
خطا (%)	۰.۳۲۲	۰.۳۲۹	۰.۲۳۷

۴- بحث و نتیجه گیری:

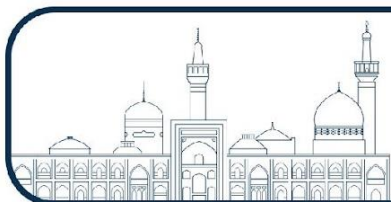
آشکارسازهای سوسوزن، نقش کارآمدی در حوزه‌های حساس و حیاتی همچون پزشکی، فیزیک هسته‌ای و امنیت ایفا می‌کنند. مواد مورد استفاده در آشکارسازهای سوسوزن با برخورد ذرات پرانرژی، نوری ساطع می‌کنند که امکان تشخیص و اندازه‌گیری



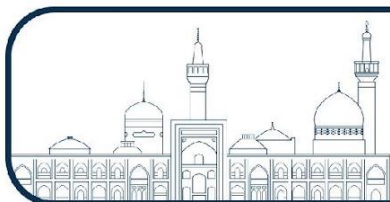
دقیق انواع مختلف تابش را فراهم می‌آورند. به همین دلیل، مواد سوسوزن باید مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاص از جمله مقاومت بالا در برابر آسیب‌های تابش و پاسخ سریع و دقیق به انواع تابش ورودی را دارا باشند. در شکل ۳، ۴ و ۵ خصوصیات فیزیکی فرایند تولید نور مرئی در آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) در طیفی از انرژی‌های رایج پرتوهای گاما، منابع رادیواکتیو CO^{60} ، Cs^{137} و Cd^{109} از خروجی ابزار شبیه سازی GEANT4 را مشاهده می‌کنید. در این تحقیق با ابزار شبیه سازی GEANT4 تعداد فوتون های نوری تولید شده تابش چشمه های مختلف CO^{60} ، Cs^{137} و Cd^{109} در آشکارسازهای سوسوزن مورد ارزیابی و شمارش قرار گرفت. در جدول ۴ تعداد فوتون های نوری تولید شده تابش چشمه های CO^{60} ، Cs^{137} و Cd^{109} نشان داده شده است. Cd^{109} ، ۴۸۵.۰۷۶ فوتون به ازای هر ذره، CO^{60} ، ۲۵۳۶۲.۴ فوتون به ازای هر ذره و Cs^{137} ، ۱۶۳۰۲.۹ فوتون به ازای هر ذره تولید شده است که خطای حاصل از نتایج کمتر از ۱ درصد می باشد. نتایج همچنین نشان می دهد که با افزایش انرژی پرتوهای گاما، تعداد فوتون های نوری افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۲ کبالت-۶۰ با انرژی MeV (۱.۱۷، ۱.۳۳) بیشترین میزان فوتون های تولیدی و کادمیوم-۱۰۹ با انرژی های KeV (۲۵، ۲۲.۱، ۸۳.۰۶، ۳۰۱.۰) کمترین میزان فوتون های نوری را دارد. همچنین این امر بدین معناست که بازدهی سوسوزن NaI(Tl) در آشکارسازی پرتوهای گاما با افزایش انرژی چشمه های گاما از افزایش می یابد. این تحقیق با بررسی نحوه تعامل فوتون های گاما با مواد سوسوزن می تواند به بهبود پارامترهای عملکردی آشکارسازها و افزایش حساسیت آنها کمک کند. ارتقای دقت در شناسایی ویژگی های بافتی و کاهش نویز تصویر می تواند منجر به تشخیص سریع تر و دقیق تر بیماری ها، به ویژه در مراحل ابتدایی سرطان شود. همچنین، نتایج این مطالعه می تواند در طراحی نسل جدید آشکارسازهای پزشکی، بهبود روش های تصویربرداری هسته ای، و ارتقای عملکرد تجهیزات فیزیک پزشکی و تحقیقات پرتویی مؤثر باشد.

۵-مراجع:

- [۱] L. Miller, A. Chapman, K. Auchetl, and J. Brown, "An Experimentally Benchmarked Geant ϵ SiPM-Based Scintillator Detector Simulation Platform for Gamma Ray Detection," *arXiv preprint arXiv:2403.02668*, ۲۰۲۴.
- [۲] J. Park *et al.*, "neuSIM ϵ : A comprehensive GEANT ϵ based neutron simulation code," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. ۱۰۶۵, p. ۱۶۹۴۷۵, ۲۰۲۴.
- [۳] L. Miller, A. Chapman, K. Auchetl, and J. M. Brown, "Material Properties of Popular Radiation Detection Scintillator Crystals for Optical Physics Transport Modelling in Geant ϵ ," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, ۲۰۲۴.
- [۴] A. Esmaili Torshabi, Z. Pedrami, M. A. Bijari, A. R. Khoshhal, A. Negarestani, and Y. Hamidi, "A Feasibility Study on Gamma-Ray Densitometer Utilization for Density Measurement of Petroleum Products at Shahid Ahmadi-Roshan Petroleum Storage in Kerman Province, Iran," *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, ۲۰۲۵.
- [۵] A. Schleife, X. Zhang, Q. Li, P. Erhart, and D. Åberg, "Excitons in scintillator materials: Optical properties and electron-energy loss spectra of NaI, LaBr 3 , BaI 2 , and SrI 2 ," *Journal of Materials Research*, vol. ۳۲, no. ۱, pp. ۵۶-۶۳, ۲۰۱۷.
- [۶] K. Ianakiev, B. Alexandrov, P. Littlewood, and M. Browne, "Temperature behavior of NaI (Tl) scintillation detectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. ۶۰۷, no. ۲, pp. ۴۳۲-۴۳۸, ۲۰۰۹.



- [۷] M. Nikl, "Scintillation detectors for x-rays," *Measurement Science and Technology*, vol. ۱۷, no. ۴, p. R۳۷, ۲۰۰۶.
- [۸] S. M. Taheri Balanoji, H. Zaki Dizaji, and A. Abdi Saray, "Photon dosimetry using selective data sampling with Particle Swarm optimization algorithm based on NaI (TI) scintillation detector," *Kerntechnik*, vol. ۸۷, no. ۳, pp. ۳۶۴-۳۷۲, ۲۰۲۲.
- [۹] A. Klett, P. Haefner, and W. Reuter, "Comparison of scintillation and gas filled detectors for contamination monitoring," ۲۰۰۶.
- [۱۰] S. L. Meo *et al.*, "A Geant^۴ simulation code for simulating optical photons in SPECT scintillation detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. ۴, no. ۰۷, p. P۰۷۰۰۲, ۲۰۰۹.
- [۱۱] D. J. van der Laan, D. R. Schaart, M. C. Maas, F. J. Beekman, P. Bruyndonckx, and C. W. van Eijk, "Optical simulation of monolithic scintillator detectors using GATE/GEANT^۴," *Physics in Medicine & Biology*, vol. ۵۵, no. ۶, pp. ۱۶۵۹-۱۶۷۵, ۲۰۱۰.
- [۱۲] A. B. Khatibani, A. R. Khoshhal, E. B. Tochae, S. R. Jamnani, and H. M. Moghaddam, "Physical and gamma radiation shielding features of Sm^۲O^۳/graphene nanoparticles: A comparison between experimental and simulated gamma shielding capability," *Inorganic Chemistry Communications*, p. ۱۱۲۷۷۲, ۲۰۲۴.
- [۱۳] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۱۴] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of ZnCo^۲O^۴ and ZnCo^۲O^۴/graphene nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.
- [۱۵] A. R. Khoshhal, A. Esmaili Torshabi, and S. Babamohammadi, "Investigation of the Produced Positrons and Their Dose Deposition at Bone and Soft Tissue Organs at Proton Therapy: A Simulation Study," *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, vol. ۳۲, no. ۱۵۵, pp. ۴۰۵-۴۱۴, ۲۰۲۴.
- [۱۶] T. Ersmark *et al.*, "Status of the DESIRE project: Geant^۴ physics validation studies and first results from Columbus/ISS radiation simulations," in *2003 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (IEEE Cat. No. 03CH37515)*, ۲۰۰۳, vol. ۳: IEEE, pp. ۱۵۴۰-۱۵۴۴.
- [۱۷] J. Apostolakis *et al.*, "Geometry and physics of the geant^۴ toolkit for high and medium energy applications," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۷۸, no. ۱۰, pp. ۸۵۹-۸۷۳, ۲۰۰۹.
- [۱۸] J. Allison *et al.*, "Geant^۴ developments and applications," *IEEE Transactions on nuclear science*, vol. ۵۳, no. ۱, pp. ۲۷۰-۲۷۸, ۲۰۰۶.
- [۱۹] G. Foldiak, "Industrial application of radioisotopes," ۱۹۸۶.



مقایسه پارامترهای فیزیکی دو آشکارساز سوسوزن NaI(Ti) و BC404 در برابر تابش گامای

چشمه های سزیم ^{137}Cs و کبالت ^{60}Co (کد مقاله: ۱۲۷۴)

خوشحال، امیررضا^۱ - اسماعیلی ترشابی، احمد^۱

۱. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،

کرمان، ایران

چکیده:

آشکارسازهای سوسوزن به دلیل حساسیت بالا و توانایی تفکیک انرژی مناسب، نقش مهمی در سیستم‌های آشکارسازی تابش دارند. در این مطالعه، پارامترهای فیزیکی در آشکارساز سوسوزن NaI(Ti) و آشکارساز سوسوزن پلاستیکی BC404 از نقطه نظر برخورد پرتو گاما با ماده مورد ارزیابی کمی قرار گرفته است. برای این کار دو چشمه های کبالت ^{60}Co و سزیم ^{137}Cs ، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو $\text{GEANT4(GEometry ANd Tracking)}$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی شامل شدت فوتون‌های مرئی تولید شده، پراکندگی کامپتون، اثر فوتوالکتریک، تابش چرینکف و پراکندگی ریلی می باشند که بسته به سیگنال مورد نظر این وقایع می توانند مورد ارزیابی قرار گیرند. همچنین تابش پرتوهای گاما نشان داد که تولید فوتون‌های نوری با افزایش انرژی پرتو گاما به صورت خطی افزایش می‌یابد و خواص ماده آشکارساز بر بازده فوتون تأثیرگذار است. همچنین، اثر فوتوالکتریک در آشکارساز NaI(Ti) و پراکندگی کامپتون در آشکارساز BC404 به وضوح قابل مشاهده است. نتایج فرآیند های فیزیکی نشان داد که آشکارساز NaI(Ti) بازدهی بسیار بیشتری نسبت به آشکارساز BC404 جهت آشکارسازی پرتوهای گاما دارد. این یافته‌ها می‌توانند در انتخاب و بهینه‌سازی مواد آشکارساز برای کاربردهای خاص در آشکارسازی پرتوهای گاما مؤثر باشند.

کلمات کلیدی: آشکارساز سوسوزن، اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تابش چرینکف، پراکندگی ریلی، مونت کارلو

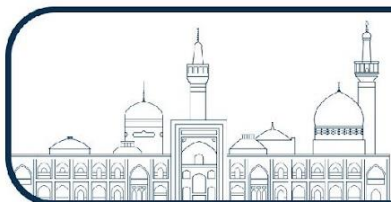
Comparison of Physical Parameters of NaI (Ti) and BC404 Scintillation Detectors Against Gamma Radiation from Cesium- ^{137}Cs and Cobalt- ^{60}Co Sources

Khoshhal, Amir Reza¹, Esmaili Torshabi, Ahmad^{1*}

^۱. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

Scintillation detectors play a crucial role in radiation detection systems due to their high sensitivity and excellent energy resolution. In this study, the physical parameters of the NaI(Ti) scintillation detector and the BC404 plastic scintillation detector were quantitatively evaluated based on the interaction of gamma rays with the detector materials. Two gamma-ray sources, cobalt- ^{60}Co and cesium- ^{137}Cs , were investigated using the Monte Carlo simulation toolkit $\text{GEANT4 (GEometry ANd Tracking)}$. The simulation results included parameters such as the intensity of visible photons produced, Compton scattering, the photoelectric effect, Cherenkov radiation, and Rayleigh scattering. Depending on the target signal, these events can be

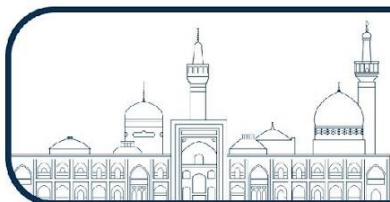


individually assessed. Gamma-ray irradiation demonstrated a linear increase in photon production with higher gamma-ray energies, and the material properties of the detectors significantly influenced photon yield. The findings clearly showed the dominance of the photoelectric effect in the NaI(Tl) detector and Compton scattering in the $BC\epsilon_{0\epsilon}$ detector. Additionally, the physical processes revealed that the NaI(Tl) detector exhibited significantly higher efficiency in detecting gamma rays compared to the $BC\epsilon_{0\epsilon}$ detector. These results are essential for selecting and optimizing detector materials for specific gamma-ray detection applications.

Key words: Scintillation Detector, Photoelectric Effect, Compton scattering, Cherenkov Radiation, Rayleigh Scattering, Monte Carlo

۱- مقدمه:

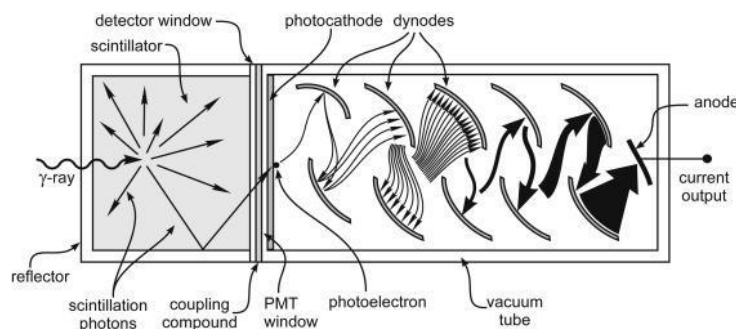
آشکارسازهای سوسوزن یکی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در سیستم‌های آشکارسازی تابش هستند که به دلیل حساسیت بالا، بازده کوانتومی مناسب و توانایی تفکیک انرژی بالا کاربرد گسترده‌ای در علوم هسته‌ای و پزشکی دارند [۱]. هنگامی که پرتوهای گاما با ماده سوسوزن برخورد می‌کنند، انرژی تابشی جذب شده توسط ماده به فوتون‌های نوری تبدیل می‌شود [۲]. بررسی رابطه بین انرژی پرتوهای گاما و شدت فوتون‌های نوری تولید شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این اطلاعات می‌توانند برای بهینه‌سازی کارایی آشکارسازها در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند [۳]. برهم‌کنش‌های پرتوهای گاما و الکترون‌های پرنرزی با ماده از جمله مهم‌ترین پدیده‌های فیزیکی در مطالعات هسته‌ای و کاربردهای مرتبط با آشکارسازی تابش هستند. از جمله این برهم‌کنش‌ها می‌توان به اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تابش چرنکوف اشاره کرد. اثر فوتوالکتریک زمانی رخ می‌دهد که یک فوتون با ماده برخورد کرده و تمام انرژی خود را به یک الکترون منتقل می‌کند و منجر به آزادسازی آن از اتم می‌شود. این پدیده در انرژی‌های پایین غالب است و به دلیل توانایی بالا در تشخیص انرژی، در کاربردهای تصویربرداری پزشکی و آشکارسازی تابش اهمیت دارد [۴]. پراکندگی کامپتون به عنوان یکی از رایج‌ترین برهم‌کنش‌های پرتو گاما در مواد، زمانی اتفاق می‌افتد که فوتون تنها بخشی از انرژی خود را به یک الکترون انتقال داده و مسیر جدیدی را در ماده طی می‌کند. این پدیده در آشکارسازهای پرتوی با انرژی متوسط و بالا نقش کلیدی دارد [۵]. تابش چرنکوف نیز زمانی رخ می‌دهد که یک ذره باردار با سرعتی بالاتر از سرعت نور در محیط دی‌الکتریک حرکت کند. این پدیده به دلیل تولید نور آبی‌فام، در آشکارسازهای نوترینو و آشکارسازی تابش‌های کیهانی مورد توجه قرار دارد [۶]. مطالعه دقیق این سه پدیده و بررسی اثرات آنها در مواد مختلف، برای بهبود طراحی و عملکرد آشکارسازهای پرتوی و کاربردهای پیشرفته هسته‌ای ضروری است. مین و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی بهینه‌سازی ضخامت آشکارساز سوسوزن پلاستیکی با عملکرد بالا که از مواد با عدد اتمی بالا بهره می‌برد، پرداختند. همچنین آشکارساز تجاری EJ-۲۰۰ با ضخامت مشابه برای مقایسه بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، مشخص شد که اختلاف تعداد کل شمارش‌ها در ضخامت‌های ۵۰ میلی‌متر و بیشتر کمتر از ۱۰٪ است، که به‌عنوان ضخامت بهینه برای آشکارسازی کارآمد پرتوهای گاما نظیر رادیوایزوتوپ‌های سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰ تعیین شد [۷]. مکس گلما و همکاران در مطالعه‌ای با بررسی و اندازه‌گیری توزیع‌های زاویه‌ای بازتاب از درون بلورها و همچنین با اصلاح اثر فوتوالکتریک، به اصلاح کدهای شبیه‌سازی در ابزارهای شبیه‌سازی GEANT۴ و GATE اقدام کردند [۸]. در مطالعه دیگری توسط یو یانگ و همکاران ویژگی‌های پایداری و پاسخ نوری به دز در دزیمتر فیبر سوسوزن پلاستیکی (PSFD) با حالت قرائت جریان برای لوله فزونساز نوری (PMT)، فتون‌مولتی‌پلایر سیلیکونی (SiPM)، دیود فتون‌آوانچ (APD) و فتون‌دیود



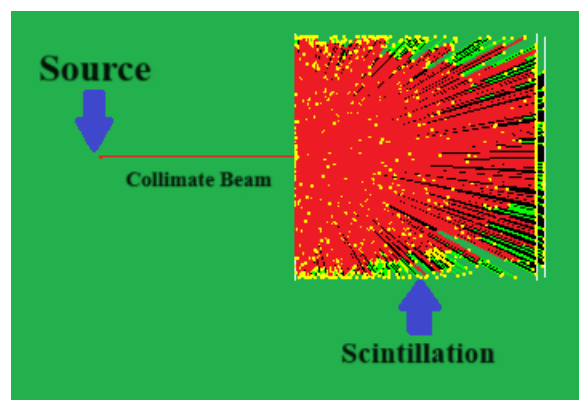
(PD) به صورت سیستماتیک بررسی شد [۹]. کد شبیه سازی جینت، امکان بهینه سازی طراحی آشکارسازها و موقعیت PMT لوله تکثیرکننده نوری را برای بهبود عملکرد فراهم می کند. GEANT ۴، که در زبان ++C و به صورت شیء گرا طراحی شده است، می تواند شرایط آزمایشگاهی را در بازه انرژی ۱ الکترون ولت تا ترا الکترون ولت شبیه سازی کند و در زمینه های فیزیک پزشکی، فیزیک هسته ای، طراحی شتاب دهنده ها و مهندسی فضایی مورد استفاده قرار می گیرد [۱۰-۱۲]. در این مطالعه با شبیه سازی آشکارساز های سوسوزن NaI(Tl) و ^{40}K فرایند های فیزیکی از جمله اثر فوتوالکتریک، تابش چرنکف، پراکندگی کامپتون و پراکندگی ریلی و همچنین تعداد فوتون های نوری تولید شده به ازای ذرات اولیه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج این مطالعه می تواند در بهینه سازی طراحی و ساخت آشکارساز های سوسوزن مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش کار:

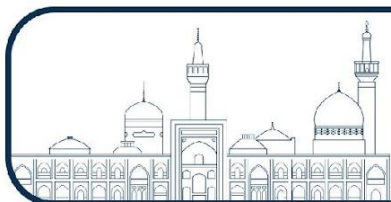
در این مطالعه که هدف آن بررسی و مقایسه فرآیندهای فیزیکی شامل اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تابش چرنکف و پراکندگی ریلی دو آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) و BC404 می باشد، از نسخه ۱۱.۱.۳ کد شبیه سازی مونت کارلوی GEANT4 و یک سیستم ۴ هسته ای با ۶ گیگ رم جهت طراحی و پردازش استفاده شده است. اساس کار آشکارسازهای سوسوزن در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ شماتیک قرارگیری چشمه های سزیم ۱۳۷ و کبالت ۶۰ و آشکارسازهای سوسوزن NaI(Tl) و BC404 نشان داده شده است.



شکل ۱: اساس کار آشکارساز های سوسوزن [۱۳]



شکل ۲: نحوه قرارگیری آشکارساز و تابش پرتو گاما



آشکارساز NaI(Ti) از جنس یدورسدیم اکتیو شده با تالیم و آشکارساز BC404 از جنس پلاستیک ونیل تولونین به شکل استوانه به طول و قطر ۳ اینچ شبیه سازی شدند. رفلکتور این آشکارسازهای سوسوزن از جنس مایلار و به قطر ۲ میلی‌متر و پنجره ورودی فزونساز نوری (PMT) از جنس کوارتز (SiO_2) با چگالی ۲.۲ گرم بر سانتی متر مکعب و طول ۵ میلی‌متر تعریف شد. ویژگی های اپتیکی شامل ضریب شکست، طول جذب، بازدهی و ضریب رفلکتیویتی در جدول ۱ نشان داده شده است. ثابت بریکس در این شبیه‌سازی ۰.۱۲۶ میلی‌متر بر مگاالکترون‌ولت در نظر گرفته شده است.

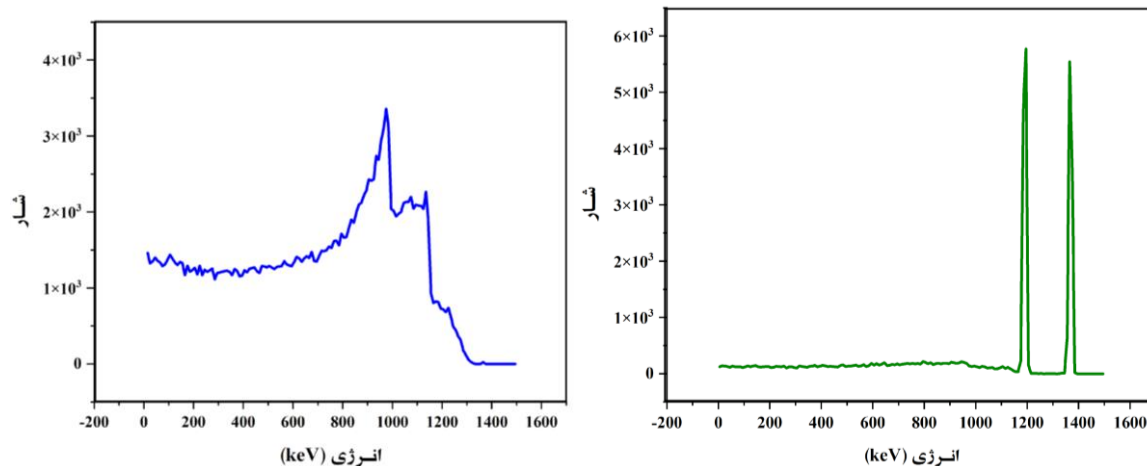
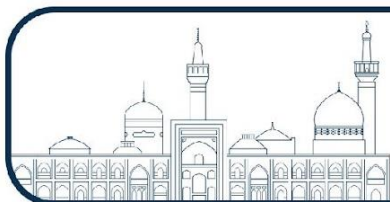
جدول ۱. ویژگی های اپتیکی آشکارساز ها [۱]

ضریب شکست BC404	ضریب شکست NaI(Ti)	ضریب شکست حجم جهانی	ضریب شکست مایلار	ضریب شکست PMT	طول جذب BC404	طول جذب NaI(Ti)	ضریب رفلکتیویتی مایلار	ضریب رفلکتیویتی PMT
۱.۵۸	۱.۸۳۹	۱.۰۰	۱.۶۵۵	۱.۴۵۸۵	۱۴۰ سانتی متر	۳۰ سانتی متر	۹۸ %	۲۵ %

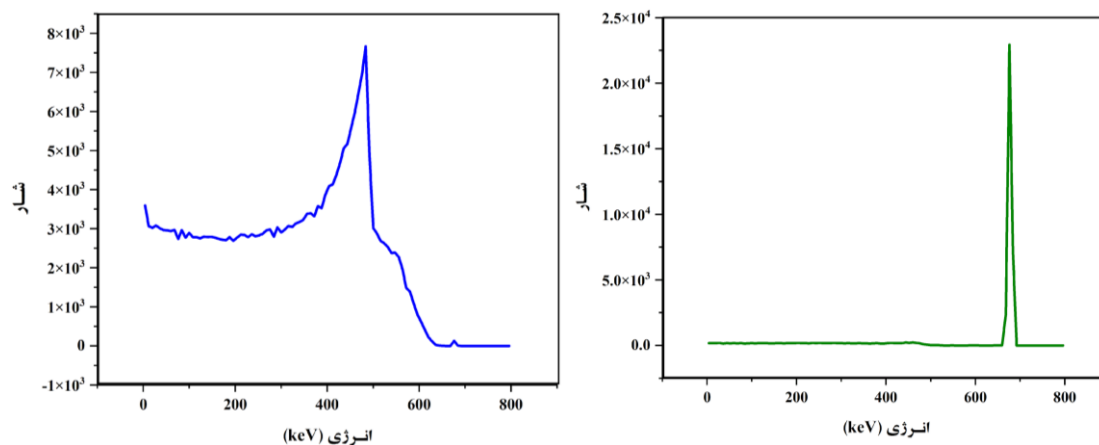
فیزیک های استفاده شده در این شبیه سازی QGSP_BIC ، $\text{G4EMStandardPhysics\_Option4}$ و G4OpticalPhysics می باشد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، چشمه ها نقطه ای و کولمیت شده در فاصله ۱۰ سانتی متری از آشکارساز قرار دارند. چشمه ها به صورت سزیم ۱۳۷ با انرژی گاما ۶۶۲ کیلوالکترون ولت و کبالت ۶۰ با دو پیک انرژی گامای ۱.۳۳ و ۱.۱۷ مگا الکترون ولت تعریف شده اند [۱۴]. تعداد فوتون های اولیه یک میلیون در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج:

در نمودارهای ارائه شده در اشکال ۳ و ۴، طیف انرژی گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ در دو آشکارساز بررسی شده است. در شکل ۳ راست، اثر فوتوالکتریک دو پیک گاما به ترتیب در انرژی های ۱۱۹۵ و ۱۳۶۵ کیلوالکترون ولت در آشکارساز NaI(Ti) ثبت شده اند و در سمت چپ شکل ۳ پراکندگی کامپتون در طیف انرژی گاما چشمه کبالت ۶۰ به وضوح قابل مشاهده می باشد. همچنین، در شکل ۵ راست، تک پیک گاما در انرژی ۶۷۶ کیلوالکترون ولت به وضوح نمایش داده شده است و در سمت چپ پراکندگی کامپتون آن مشخص می باشد. در جدول ۲ نتایج فرآیند های فیزیکی شامل اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تابش چرنکف و پراکندگی ریلی دو آشکارساز سوسوزن در برابر چشمه های گاما از نشان داده شده است.



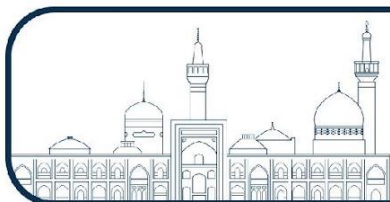
شکل ۳: طیف انرژی گاما چشمه کبالت-۶۰ در دو آشکارساز NaI(Tl) (راست) و BC404 (چپ)



شکل ۴: طیف انرژی گاما چشمه سزیم-۱۳۷ در دو آشکارساز NaI(Tl) (راست) و BC404 (چپ)

جدول ۲: تعداد فرآیند های فیزیکی و تعداد فوتون های نوری تولید شده در برابر تابش چشمه های مختلف (تعداد نره)

خطا (%)	تعداد فوتون های نوری تولید شده	پراکندگی رایلی	تابش چرنکف	پراکندگی کامپتون	اثر فوتوالکتریک	نوع آشکارساز	چشمه
۰.۳۵۸۷	۲۵۳۶۲.۴	۰.۱۰۱۳۴	۴۰.۳۳۳	۱.۳۲۵۴	۱.۰۷۰۰۲	NaI (Ti)	Co-۶۰
۰.۲۳۳۵	۲۳۶۳.۶۹	۰.۰۰۱۵۸۴	۱۰.۱۵۵۲	۰.۵۶۰۷۱۴	۰.۰۰۹۳۵۴	BC404	
۰.۳۱۰۰	۱۶۳۰۲.۹	۰.۱۵۸۵	۱۵.۳۲۷۵	۱.۳۴۵	۱.۳۹۱	NaI (Ti)	Cs-۱۳۷
۰.۲۲۷۳	۱۳۲۵.۹۲	۰.۰۰۲۳۷۶	۲.۱۲۸۶۱	۰.۷۴۱۷۴۸	۰.۰۰۵۲۶۴	BC404	

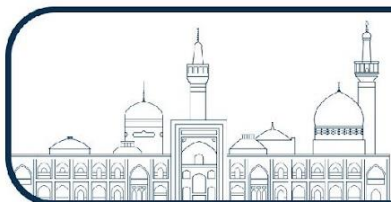


۴- بحث و نتیجه گیری:

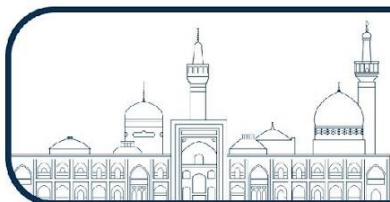
آشکارسازهای سوسوزن به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در سیستم‌های آشکارسازی تابش، نقش کلیدی در علوم هسته‌ای، پزشکی و صنعتی ایفا می‌کنند. این آشکارسازها با تبدیل انرژی تابشی پرتوهای گاما، نوترون یا ذرات باردار به فوتون‌های نوری، امکان تشخیص و اندازه‌گیری تابش را فراهم می‌آورند. ویژگی‌هایی مانند حساسیت بالا، زمان پاسخ سریع و توانایی تفکیک انرژی مناسب موجب شده است که این آشکارسازها به‌ویژه در کاربردهای تشخیصی پزشکی مانند تصویربرداری PET، اندازه‌گیری دز تابش و نظارت بر ایمنی هسته‌ای مورد توجه قرار گیرند. در این مطالعه، دو نوع آشکارساز سوسوزن NaI (Ti) و ^{40}KBC در برابر چشمه‌های سزیم ^{137}Cs و کبالت ^{60}Co شبیه‌سازی شدند. پارامترهایی نظیر اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تابش چرنکف و پراکندگی ریلی و تعداد فوتون‌های نوری تولید شده مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد اثر فوتوالکتریک به ازای هر ذره در آشکارسازهای NaI (Ti) و ^{40}KBC در برابر چشمه کبالت ^{60}Co به ترتیب برابر 1.07×10^4 و 0.09354×10^4 و در برابر چشمه سزیم ^{137}Cs به ترتیب برابر 1.391 و 0.05264×10^4 می‌باشد. در آشکارسازهای پلاستیکی اثر فوتوالکتریک بسیار کم‌رنگ می‌باشد. از آن طرف تعداد پراکندگی کامپتون به ازای هر ذره در آشکارسازهای NaI (Ti) و ^{40}KBC در برابر چشمه کبالت ^{60}Co به ترتیب برابر 1.3254 و 0.560714 و در برابر چشمه سزیم ^{137}Cs به ترتیب برابر 1.345 و 0.741748 می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۲ و شکل‌های ۳ و ۴ سمت چپ، پراکندگی کامپتون در آشکارسازهای سوسوزن بسیار مشهود می‌باشد. تعداد فوتون‌های نوری تولید شده آشکارساز NaI (Ti) بسیار بیشتر از ^{40}KBC می‌باشد. همچنین می‌توان اذعان نمود با توجه به اینکه انرژی گاما چشمه کبالت ^{60}Co از انرژی گاما سزیم ^{137}Cs بیشتر می‌باشد، میزان تولید فوتون‌های نوری نیز بیشتر می‌باشد. تابش چرنکف در آشکارسازهای سوسوزن NaI (Ti) نسبت به آشکارساز ^{40}KBC و در برابر چشمه کبالت ^{60}Co نسبت به سزیم ^{137}Cs بیشتر صورت گرفته است. پراکندگی ریلی در دو آشکارساز بسیار کم و نامحسوس می‌باشد. بنابر نتایج بدست آمده، آشکارساز سوسوزن NaI (Ti) بازدهی بسیار بالاتری نسبت به آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی از جمله ^{40}KBC در آشکارسازی پرتوهای گاما دارند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی پارامترها و فرآیندهای فیزیکی بیشتری در انواع دیگری از آشکارسازهای سوسوزن مورد بررسی قرار گیرد.

۵- مراجع:

- [۱] L. Miller, A. Chapman, K. Auchetl, and J. M. Brown, "Material Properties of Popular Radiation Detection Scintillator Crystals for Optical Physics Transport Modelling in Geant ^{4} ," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, ۲۰۲۴.
- [۲] J. Park *et al.*, "neuSIM ^{4} : A comprehensive GEANT ^{4} based neutron simulation code," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. ۱۰۶۵, p. ۱۶۹۴۷۵, ۲۰۲۴.
- [۳] L. Miller, A. Chapman, K. Auchetl, and J. Brown, "An Experimentally Benchmarked Geant ^{4} SiPM-Based Scintillator Detector Simulation Platform for Gamma Ray Detection," *arXiv preprint arXiv:2403.02668*, ۲۰۲۴.
- [۴] W. Qian, "On the Physical Process and Essence of the Photoelectric Effect," *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. ۱۱, no. ۶, pp. ۱۵۸۰-۱۵۹۷, ۲۰۲۳.
- [۵] S. S. Hsieh and K. Taguchi, "Spectral information content of Compton scattering events in silicon photon counting detectors," *Medical physics*, vol. ۵۱, no. ۴, pp. ۲۳۸۶-۲۳۹۷, ۲۰۲۴.
- [۶] R. Latella *et al.*, "Exploiting Cherenkov radiation with BGO-based metascintillators," *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, ۲۰۲۳.
- [۷] S. Min *et al.*, "Optimization of plastic scintillator for detection of gamma-rays: simulation and experimental study," *Chemosensors*, vol. ۹, no. ۹, p. ۲۳۹, ۲۰۲۱.



- [۸] M. Ghelman, N. Kopeika, S. Rotman, N. B. David, E. Vax, and A. Osovizky, "Wide Energetic Response of $\epsilon\pi$ Directional Gamma Detector based on Combination of Compton Scattering and Photoelectric Effect," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, ۲۰۲۴.
- [۹] Y. Yang *et al.*, "Performance of a plastic scintillation fiber dosimeter based on different photoelectric devices," *Nuclear Science and Techniques*, vol. ۳۲, no. ۱۱, p. ۱۲۰, ۲۰۲۱.
- [۱۰] A. B. Khatibani, A. R. Khoshhal, E. B. Tochae, S. R. Jamnani, and H. M. Moghaddam, "Physical and gamma radiation shielding features of Sm_2O_3 /graphene nanoparticles: A comparison between experimental and simulated gamma shielding capability," *Inorganic Chemistry Communications*, p. ۱۱۲۷۷۲, ۲۰۲۴.
- [۱۱] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۱۲] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of ZnCo_2O_4 and ZnCo_2O_4 /graphene nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.
- [۱۳] T. W. Kerlin and B. R. Upadhyaya, *Dynamics and control of nuclear reactors*. Academic press, ۲۰۱۹.
- [۱۴] G. Foldiak, "Industrial application of radioisotopes," ۱۹۸۶.



بررسی ذرات ثانویه تولید شده ناشی از برخورد $4\text{He}(4\text{He},4\text{He})4\text{He}^*$ در مرکز MAGNEX با

استفاده از فرایند اسپالیشن در ابزار Geant^۴ (کد مقاله : ۱۲۷۸)

بهشاد والی زاده ^{۱*}، سعید دانیالی کهلبونی ^۲، محمد رضا رضایی ^۳

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده:

در این تحقیق با فعالسازی فرایند اسپالیشن مدهای دیگر واپاشی $4\text{He}(4\text{He},4\text{He})4\text{He}^*$ بررسی و امکان تولید گاما در برهمکنش مذکور با استفاده از ابزار Geant^۴ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که پرتوهای گاما و نوترون با انرژی 1.97 MeV در انرژی برخوردی 40 MeV می تواند یکی از مشخصات این برهمکنش باشد که از آن برای اندازه گیری آلفا در انرژی های بالا می توان استفاده کرد. بررسی محصولات اسپالیشن نشان می دهد که احتمال برهمکنش $He + 3H + 1H$ و $He + 3He + 1n$ به ترتیب برابر $5-EV.1$ و $4-E1.07$ در انرژی برخوردی 50 MeV می باشد. در برهمکنش مذکور $e^+ + e^- + 9Be + \text{deuteron} + 7Li + 6Li + Be$ و نیز تولید می شود که مدهای واپاشی هر یک از این ذرات علاوه بر دو مد اولیه معرفی شده اند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش انرژی ذرات آلفا احتمال تولید گاما و ذرات ثانویه و مدهای واپاشی افزایش میابد.

کلمات کلیدی: برهمکنش $He-He$ ، مدهای واپاشی، گاما، ذرات ثانویه، اسپالیشن، Geant⁴

Study of the secondary particle produce in $4\text{He}(4\text{He},4\text{He})4\text{He}^*$ Collision at MAGNEX facility by Spallation processes in Geant^۴ Toolkit

Valizadeh Behshad ^{۱*}, Danyaly Khohlboni Saeid ^۲, Rezaie Mohammad Reza ^۳

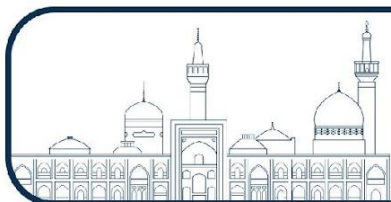
^۱ Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization, Tehran, Iran

^۲ Department of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^۳ Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

In this research, by studying the spallation process of other decay modes of $4\text{He}(4\text{He},4\text{He})4\text{He}^*$, the possibility of gamma production in the mentioned interaction was studied using the Geant^۴ toolkit. The results show that gamma rays and neutrons with an energy of 1.97 MeV at

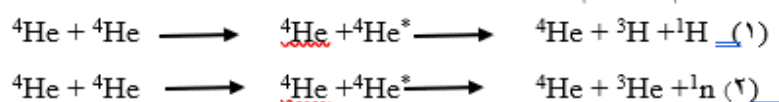


$4 \cdot \text{MeV}$ alpha energy can be one of the characteristics of this interaction, which can be used to measure alpha at high energies. The investigation of spallation products shows that the interaction probabilities of $^4\text{He} + ^3\text{H} + ^1\text{H}$ and $^4\text{He} + ^3\text{He} + ^1\text{n}$ are $7.1\text{E}-5$ and $1.07\text{E}-4$, respectively, at $50 \cdot \text{MeV}$ alpha energy. In the mentioned interaction, ^7Be , ^6Li , ^7Li , ^2H , ^9Be , e^- , e^- and ν_e are also produced, and the decay modes of each of these particles are introduced in addition to the two primary modes. The results of this research show that with an increase in the energy of alpha particles, the probability of producing gamma and secondary particles and decay modes increases.

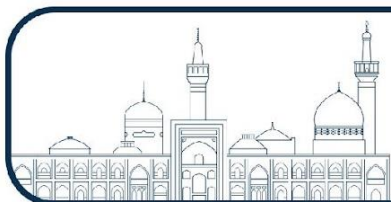
Key words: He-He interaction, decay modes, gamma, secondary particles, spallation, Geant4

۱ - مقدمه:

عنصر ^4He موجود در زمین توسط واپاشی آلفای عناصر سنگین تر تولید می شود و مقداری از آن در هنگام انفجار بزرگ ایجاد شده است [۱،۲]. ذرات آلفا کاملاً پایدار هستند زیرا با دو عدد نوترونی و پروتونی که اولین عدد جادویی است ترازهای هسته ای کاملاً پر شده ای دارند [۳]. به علت پر شدن ترازهای نوترونی یا پروتونی انرژی جداسازی نوترون و پروتون از این هسته زیاد است [۴،۵]. همچنین فاصله انرژی ترازهای برانگیخته نوترونی یا پروتونی از تراز پایه نیز زیاد می باشد [۶]. برای برانگیخته کردن هسته های هلیوم و مطالعه پرتوهای گاما و مدهای تابشی دیگر از برخوردهای هسته ای استفاده می شود [۷]. برخورد هلیوم با هلیوم در دوره های خاصی از عمر ستاره به وقوع می پیوندد. وقتی یک ستاره، به ویژه ستاره های کمتر از حدود ۸ برابر جرم خورشید به پایان دوره همجوشی هیدروژن در هسته اش می رسد، هسته ستاره به طور قابل توجهی متراکم می شود و دما افزایش می یابد. در این دماهای بالا، هلیوم، که از همجوشی هیدروژن ایجاد شده است، شروع به برخورد با هلیوم های دیگر می کنند و فرایند همجوشی هلیوم هلیوم تبدیل می شود. شروع همجوشی هلیوم هلیوم در انرژی نزدیک 8 MeV اتفاق می افتد [۸]. این مرحله به دوره هلیوم معروف است. همچنین در این مرحله امکان انجام فرایند سه گانه آلفا نیز وجود دارد که در آن محصولات همجوشی آلفا با ذرات آلفا برهمکنش کرده و کربن ^{12}C شکل می گیرد. امکان برخورد هلیوم هلیوم در سطح زمین تا انرژی 50 MeV نیز فراهم شده است. مناسب ترین راه برای برانگیخته کردن هسته های هلیوم برخورد یون های هلیوم پر انرژی به هدف هلیومی برهمکنش $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}^* \rightarrow ^4\text{He} + ^3\text{H} + ^1\text{H}$ (۱) می باشد [۹]. یکی از مراکز تحقیقاتی که در زمینه برخورد هلیوم - هلیوم فعالیت میکند مرکز MAGNEX facility می باشد. [۱۰] در این مرکز از شتاب دهنده سیکلوترون 800 kV موسسه بین المللی فیزیک هسته ای ایتالیا (INFN-LNS) برای افزایش انرژی یون های هلیوم تا 53 MeV استفاده شده است. نتایج برخورد هلیوم-هلیوم در انرژی 53 MeV نشان داد که دو مد واپاشی (۱) و (۲) در برخورد هلیوم - هلیوم وجود دارد [۹،۱۰].



با توجه به معادلات ۱ و ۲ در اثر برخورد هلیوم - هلیوم ابتدا هسته مرکب $^8\text{He}^*$ شکل میگیرد و سپس این هسته مرکب یا به صورت $^3\text{H} + ^1\text{H}$ و یا به صورت $^3\text{He} + ^1\text{n}$ واپاشی میکند [۱۱]. نکته ای که در برخورد هلیوم - هلیوم به آن توجه نشده است، احتمال انجام فرایند اسپالیشن است. معمولاً فرایند اسپالیشن در حالتی اتفاق می افتد که انرژی ذره فرودی بیشتر از



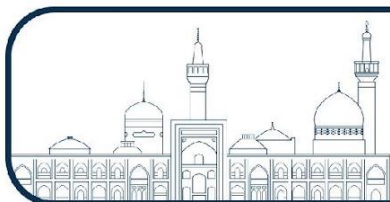
انرژی بستگی ذرات تشکیل دهنده هسته هدف باشد [۱۲]. در این حالت هسته هدف با جذب ذره برخوردی به هسته مرکب تبدیل شده و امکان تبدیل هسته مرکب به هسته‌هایی با عدد جرمی کمتر از هسته هدف، ذرات ثانویه شامل پروتون، نوترون، الکترون، پوزیترون، پرتوهای ایکس و گاما و غیره وجود دارد [۱۳]. جهت بررسی مدهای دیگر واپاشی هسته مرکب علاوه بر دو مد ذکر شده می‌توان از کدهای MCNPX و GEANT استفاده کرد. این کدها بر اساس اصول مونت کارلو به تولید ذرات ثانویه و ردیابی آن‌ها می‌پردازد. کد MCNPX به علت محدودیت انرژی حد پایین در ردیابی ذره آلفا که با کارت CUT قابل برطرف شدن نیست برای این امر مناسب نیست [۱۴]. ابزار GEANT یکی از کدهای توانمند هسته‌ای است که دارای کتابخانه داده‌های سطح مقطع هسته‌ای به روز شده می‌باشد [۱۵] که در زمینه مطالعات فرایند اسپالیشن کارساز است [۱۶]. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از ابزار GEANT به بررسی مدهای واپاشی دیگر و احتمال انجام آن‌ها همچنین تولید پرتوی گاما یا نوترون با انرژی مشخص از برخورد هلیوم - هلیوم به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری ذرات آلفای پر انرژی پرداخته شود. در ادامه به چگونگی انجام این کار پرداخته می‌شود.

۲- روش کار:

در این مطالعه، برای محاسبه محصولات اسپالیشن برخورد هلیوم - هلیوم از شبیه‌ساز ردیابی ذرات GEANT استفاده شد. این نرم‌افزار به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های فیزیک ذرات و شبیه‌سازی برهمکنش ذرات باردار با ماده به کار می‌رود. برای محاسبه محصولات اسپالیشن، یک هندسه سه‌بعدی ساده شامل یک هدف و چشمه تابشی تعریف شد. هدف، یک گاز هلیوم است که جنس و مشخصات آن از کتابخانه ماده ابزار GEANT به صورت G^4_HELIUM گرفته شده است. چشمه تابشی در فایل ماکرو به صورت GPS و با دستور $ION\ 2\ 40\ 100\ MeV$ با انرژی $40\ 100\ MeV$ تعریف شده است. از ماژول‌های فیزیکی مربوط به شبیه‌سازی اسپالیشن در GEANT مانند $G^4HadronElasticProcess$ و $G^4HadronInelasticProcess$ برای بررسی محصولات اسپالیشن ذرات در هنگام برخورد به کار گرفته شدند. شبیه‌سازی با تعداد ۱۰ میلیون ذره برای رسیدن به خطای زیر ۱ درصد انجام شد. محصولات اسپالیشن احتمالی، مانند نوترون‌ها، پرتوهای گاما، و ذرات ثانویه دیگر جمع‌آوری و تحلیل شدند. داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار تحلیلی ROOT تحلیل شدند. در این مرحله، از تکنیک‌های آماری و گرافیکی برای بررسی توزیع و انرژی محصولات اسپالیشن بهره گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده همچنین با داده‌های تجربی موجود مقایسه شدند تا صحت شبیه‌سازی ارزیابی شود. با استفاده از روش‌های فوق و ابزار GEANT، محصولات اسپالیشن دقیقاً شبیه‌سازی و تحلیل شدند که نتایج حاصله پایه مناسبی برای مطالعات بعدی در زمینه آشکارسازی ذرات آلفا و مدهای واپاشی برخورد هلیوم - هلیوم می‌باشد.

۳- نتایج:

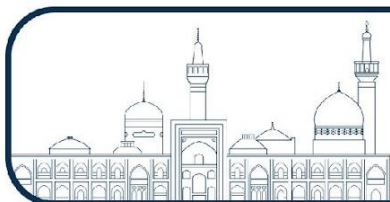
مطابق جدول ۱، نتایج شبیه‌سازی Geant نشان می‌دهد که در اثر برهمکنش اسپالیشن $^4He(X,Y)^4He$ ذرات ثانویه X و عناصر برانگیخته Y تولید می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده تعداد و انرژی ذرات ثانویه بستگی به انرژی He برخوردی دارد. با افزایش انرژی احتمال تولید بیشتر ذرات ثانویه افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که تعداد ذرات چشمه در این مطالعه ۱۰۶ ذره فرض شده است که با تقسیم بر تعداد ذرات ثانویه بهره تولید این ذرات بدست می‌آید. از بین محصولات اسپالیشن نشان داده شده در جدول ۱ بعضی از عناصر ثانویه مربوط به دو برهمکنش ۱ و ۲ که نتیجه‌ای از واپاشی



هسته برانگیخته ${}^4\text{He}^*$ در برهمکنش ${}^4\text{He} ({}^4\text{He}, {}^4\text{He}) {}^4\text{He}^*$ می باشد. جدول ۲ لیست تعداد محصولات واپاشی هسته برانگیخته واکنش ۱ و ۲ در انرژی های مختلف آلفای برخوردی را نشان می دهد.

جدول ۱: لیست ذرات ثانویه تولید شده در اثر برهمکنش ${}^4\text{He} ({}^4\text{He}, X) Y^*$

Alpha Energy (MeV)	۴۰		۵۰		۷۰		۱۰۰	
Particle production	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)
${}^{10}\text{B}$	۷	۰.۰۰۵	۲	۰.۰۱	۷	۰.۰۰۳	۱۵	۰.۵۵
${}^7\text{Be}$	۱۶۹۱	۱۷.۱۷	۱۸۸۲	۱۷.۳۵	۱۹۸۱	۱۷.۳۸	۱۹۱۰	۱۷.۴۲
${}^9\text{Be}$	۰	۰	۰	۰	۱	۵.۹۹	۳	۸.۹۹
${}^6\text{Li}$	۰	۰	۱۴۴	۱۸.۷۱	۱۷۶۲۵	۲۴.۱۷	۳۳۵۰۸	۲۸.۵۴
${}^7\text{Li}$	۶۶۹۵	۱۲.۸۴	۷۲۲۹	۱۲.۷۴	۷۴۹۵	۱۲.۶۹	۷۱۶۳	۱۲.۷۲
${}^2\text{H}$	۰	۰	۱۴۴	۷.۶۵	۴۳۵۵۸	۱۱.۴۳	۲۱۰۹۸۲	۱۶.۰۳
${}^4\text{He}$	۲۳۹۹۰۴	۱۰.۲۰۳ ۷	۳۸۵۵۰۱	۱۲.۷۱۶ ۳	۶۸۳۹۷۶	۱۴.۵۸۷ ۶	۱۲۳۱۶۷ ۳	۱۵.۰۳۱ ۱
e^+	۰	۰	۰	۰	۱۶	۰.۰۰۲	۱۶	۰.۵۸
e^-	۵۳۱	۰.۱۲	۷۳۲	۰.۱۴	۵۷۷۲	۰.۵۸۳	۸۹۲۹	۰.۶۷۴
Gamma ray	۱۰۸۷	۰.۴۷	۱۵۵۴	۰.۶۸	۱۷۵۴۷	۱.۷۶	۲۹۰۵۴	۱.۹۱
$e\nu$	۱۶۸۹	۰.۸۱	۱۸۸۱	۰.۸۰	۱۹۸۱	۰.۸۱۳	۱۹۱۰	۰.۸۲
${}^1\text{H}$	۴۸۳۸	۴.۲۹۵۵ ۶	۵۲۴۰	۴.۳۰۱۶ ۶	۲۳۶۳۱	۷.۱۰۰۱ ۶	۱۲۴۵۰۴	۱۱.۷۴۴
${}^3\text{H}$	۲	۳.۹۵۵۸ ۲	۱۰۷	۱۰.۸۸۲ ۶	۸۷۸۳	۱۴.۹۸۰ ۱	۳۱۹۱۰	۱۹.۹۷۰ ۵
${}^3\text{He}$	۰	۰	۷۱	۱۱.۶۷۲ ۶	۷۵۵۱	۱۵.۴۲۸ ۷	۲۹۹۳۷	۲۰.۴۶۶ ۲
Neutron	۱۶۹۴	۲.۹۸۲۰ ۲	۱۹۵۴	۳.۰۰۹۳	۱۹۰۸۷	۶.۱۳۸۴ ۲	۱۱۹۹۸۲	۱۰.۱۴۳

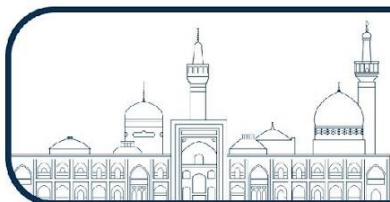


با توجه به پایداری ذرات در واکنش ۱ و ۲ لیست ذره ثانویه که کمترین تعداد را دارد به عنوان معیار در نظر می‌گیریم در نتیجه احتمال هر برهمکنش برابر فراوانی های این عنصر تقسیم بر ۱۰۶ ذره اولیه است.

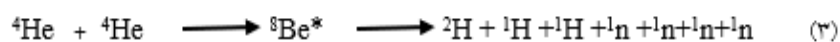
جدول ۲: لیست تعداد محصولات واپاشی هسته برانگیخته واکنش های ۱ و ۲

${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}^* \longrightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$							
Energy (MeV)	Number of ${}^4\text{He}$	number of ${}^3\text{H}$	number of ${}^1\text{H}$	${}^4\text{He}$ Energy	${}^3\text{H}$ Energy	${}^1\text{H}$ Energy	احتمال برهمکنش ۱
۴۰	۲۳۹۹۰۴	۲	۴۸۳۸	۱۰.۲۰۳۷	۳.۹۵۵۸۲	۴.۲۹۵۵۶	${}^2\text{E}-۶$
۵۰	۳۸۵۵۰۱	۱۰۷	۵۲۴۰	۱۲.۷۱۶۳	۱۰.۸۸۲۶	۴.۳۰۱۶۶	${}^1.۰۷\text{E}-۴$
۷۰	۶۸۳۹۷۶	۸۷۸۳	۲۳۶۳۱	۱۴.۵۸۷۶	۱۴.۹۸۰۱	۷.۱۰۰۱۶	${}^۸.۷۸\text{E}-۳$
۱۰۰	۱۲۳۱۶۷۳	۳۱۹۱۰	۱۲۴۵۰۴	۱۵.۰۳۱۱	۱۹.۹۷۰۵	۱۱.۷۴۴	${}^۳.۱۹\text{E}-۲$
${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}^* \longrightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + {}^1\text{n}$							
Energy (MeV)	number of ${}^4\text{He}$	number of ${}^3\text{He}$	number of Neutron	${}^4\text{He}$ Energy	${}^3\text{He}$ Energy	Neutron Energy	احتمال
۴۰	۲۳۹۹۰۴	۰	۱۶۹۴	۱۰.۲۰۳۷	۳.۹۵۵۸۲	۴.۲۹۵۵۶	۰
۵۰	۳۸۵۵۰۱	۷۱	۱۹۵۴	۱۲.۷۱۶۳	۱۰.۸۸۲۶	۴.۳۰۱۶۶	${}^۷.۱\text{E}-۵$
۷۰	۶۸۳۹۷۶	۷۵۵۱	۱۹۰۸۷	۱۴.۵۸۷۶	۱۴.۹۸۰۱	۷.۱۰۰۱۶	${}^۷.۵۵\text{E}-۳$
۱۰۰	۱۲۳۱۶۷۳	۲۹۹۳۷	۱۱۹۹۸۲	۱۵.۰۳۱۱	۱۹.۹۷۰۵	۱۱.۷۴۴	${}^۲.۹۹\text{E}-۲$

با توجه به نتایج جدول ۱ لیست ذرات ثانویه غیر از برهمکنش ۱ و ۲ استخراج شد که در جدول ۳ آورده شده است. بعضی از این ذرات مثل ${}^7\text{Li}$ ، ${}^6\text{Li}$ ، Be^* ، دوترون، الکترون مثبت، الکترون منفی، گاما و نوترینو می‌توانند محصول اسپالیشن و واپاشی هسته مرکب Be^* ایجاد شده در برخورد ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ باشند. همانطور که از نتایج جدول ۱ مشخص است آستانه تولید بعضی از ذرات بالاتر از بعضی از ذرات دیگر است (مثل دوترون، Be^9 و الکترون مثبت) و با افزایش انرژی



نیز بهره و انرژی تولید این ذرات (غیر از B^{10}) افزایش می‌ابد. به علت اینکه حداکثر عدد جرمی هسته مرکب توسط برخورد دو ذره آلفا عدد ۸ میباشد، عناصر ثانویه B^{10} و Be^9 ناشی از برهمکنش های ثانویه هسته مرکب و محصولات Be^7 و Be^8 و Be^9 ذره تابشی و ذرات ثانویه دیگر میباشد. به طور مثال B^{10} میتواند محصول برهمکنش ثانویه B^{10} باشد. همچنین Be^9 محصول برهمکنش Be^8 با نوترون های ثانویه است $(^8Be + ^1_0n \rightarrow ^9Be + \gamma)$ و نوترون و پروتون های اضافه بر واکنش ۱ و ۲ نیز می تواند یکی از محصولات اسپالیشن هسته مرکب Be^9 باشند. همچنین معادله ۳ با توجه به محصولات برهمکنش امکان پذیر است.

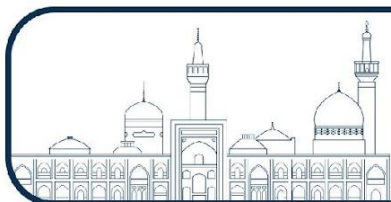


نوترینو، الکترون مثبت و الکترون منفی نیز یکی از محصولات پروتون ها و نوترون های ثانویه تولید شده. گامای مشخصه در جدول ۳ که انرژی آن ها بین ۴۷۰.۸۶۵ keV تا ۱.۹۱۱۲۴ MeV متغیر است می تواند ناشی از تابش واپاشی گامازای هسته برانگیخته هلیوم یا هسته مرکب برلیوم یا محصولات اسپالیشن باشد.

جدول ۳: لیست ذرات ثانویه غیر از برهمکنش ۱ و ۲

Alpha Energy (MeV)	۴۰		۵۰		۷۰		۱۰۰	
Particle production	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)	Number	Energy (MeV)
B^{10}	۷	۰.۰۰۵	۲	۰.۰۱	۷	۰.۰۰۳	۱۵	۰.۵۵
Be^7	۱۶۹۱	۱۷.۱۷	۱۸۸۲	۱۷.۳۵	۱۹۸۱	۱۷.۳۸	۱۹۱۰	۱۷.۴۲
Be^9	۰	۰	۰	۰	۱	۵.۹۹	۳	۸.۹۹
Li^6	۰	۰	۱۴۴	۱۸.۷۱	۱۷۶۲۵	۲۴.۱۷	۳۳۵۰۸	۲۸.۵۴
Li^7	۶۶۹۵	۱۲.۸۴	۷۲۲۹	۱۲.۷۴	۷۴۹۵	۱۲.۶۹	۷۱۶۳	۱۲.۷۲
H^2	۰	۰	۱۴۴	۷.۶۵	۴۳۵۵۸	۱۱.۴۳	۲۱۰۹۸۲	۱۶.۰۳
e^+	۰	۰	۰	۰	۱۶	۰.۰۰۲	۱۶	۰.۵۸
e^-	۵۳۱	۰.۱۲	۷۳۲	۰.۱۴	۵۷۷۲	۰.۵۸۳	۸۹۲۹	۰.۶۷۴
Gamma ray	۱۰۸۷	۰.۴۷	۱۵۵۴	۰.۶۸	۱۷۵۴۷	۱.۷۶	۲۹۰۵۴	۱.۹۱
$e \nu$	۱۶۸۹	۰.۸۱	۱۸۸۱	۰.۸۰	۱۹۸۱	۰.۸۱۳	۱۹۱۰	۰.۸۲

جدول ۴ لیست ذرات قابل آشکارسازی ناشی از برهمکنش ذرات آلفا با آلفا را در انرژی های مختلف ذره تابشی آلفا که بر هسته های آلفا برخورد میکند را نشان می دهد همانطور که از نتایج جدول ۱، ۳ و ۴ مشخص است انرژی گاما و نوترون قابل آشکارسازی



مقداری از انرژی گاما و نوترون تولید شده کوچک تر است. این امر ناشی از تضعیف گاما و نوترون تولید شده هنگام عبور از گاز هلیوم است. بنابراین امکان شناسایی ذرات آلفا با انرژی بالا با استفاده از تابش ذرات ثانویه قابل آشکارسازی مثل نوترون و گاما از هدف هلیوم وجود دارد. معنی آن این است که برای آشکارسازی ذرات آلفای پر انرژی این ذرات را بر هدفی از گاز هلیوم تابیده شده و با اندازه گیری احتمال گسیل نوترون و گاما میتوان شدت ذرات آلفای تابیده شده را بدست آورد. به طور مثال نتایج جدول ۴ نشان می دهد در صورتی که ذرات آلفا با انرژی ۴۰ MeV بر هدفی از گاز هلیوم برخورد کند احتمال تولید گاما و نوترون قابل اندازه گیری با انرژی های ۰.۴۱ MeV و ۱.۹۸ MeV به ترتیب برابر $E_{1.09}-E_{1.69}$ و $E_{3}-E_{1.69}$ می باشد.

جدول ۴: لیست ذرات قابل آشکارسازی ناشی از برهمکنش ذرات آلفا با آلفا

Alpha Energy(MeV)	۴۰		۵۰		۷۰		۱۰۰	
Particle detection able	Num ber	Energy	Num ber	Energy	Num ber	Ener gy	Num ber	Ener gy
Gamma	۱۰۸۷	۴۱۰.۵۰۷ keV	۱۵۵۲	۵۹۹.۶۴۲ keV	۱۷۵۱	۱.۵۶۸ ۵۹	۲۹۰۱	۱.۷۰۵ ۷۳
Neutron	۱۶۹۴	۱.۹۷۵۲۷	۱۹۵۴	۱.۹۸۳۳۲	۱۹۰۸	۴.۸۸۲ ۴۹	۱۱۹۴	۸.۶۷۱ ۹۹

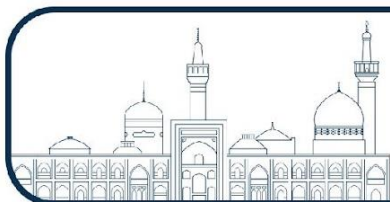
نتایج جدول ۵ که با استفاده از داده های جدول ۴ استخراج شده، احتمال آشکارسازی ذرات آلفای پر انرژی را با استفاده از پرتوهای گاما و نوترون مشخصه در انرژی های مختلف ذره آلفا نشان می دهد.

جدول ۵: احتمال آشکارسازی ذرات آلفای پر انرژی با استفاده از گاما و نوترون مشخصه

Alpha energy (MeV)	Gamma characteristic (MeV)	Pobabilit y	Neutron characteristic (MeV)	Pobabilit y
۴۰	۰.۴۱	$1.087E-3$	۱.۹۷۵۲۷	$1.69E-3$
۵۰	۰.۵۹۹	$1.552E-3$	۱.۹۸۳۳۲	$1.95E-3$
۷۰	۱.۵۶۹	$1.75E-2$	۴.۸۸۲۴۹	$1.91E-2$
۱۰۰	۱.۷۰۶	$2.90E-2$	۸.۶۷۱۹۹	$1.19E-1$

۳-۱- صحت سنجی:

برای صحت سنجی محصولات برهمکنش $He - He$ نتایج بدست آمده با نتایج تحقیق Guessoum و همکاران مقایسه شد [۱۱]. در تحقیق Guessoum محصولات ناشی از اسپالیشن هلیوم شامل عناصر ^7Li , ^6Li , ^1H , ^2H , ^3He , ^4He و نوترون می باشد که ۶۰ درصد عناصر تولید شده در این تحقیق است که شامل ذرات ^{10}Be , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}C و نوترینو نمی شود.

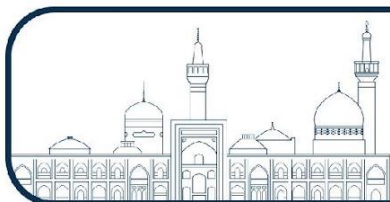


۴- بحث و نتیجه گیری:

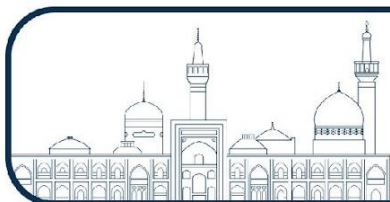
در این تحقیق جهت بررسی دقیق تر محصولات همجوشی هلیوم هلیوم از ابزار GEANT^۴ استفاده شد. محصولات همجوشی شامل ایزوتوپ های برلیوم (${}^{10}\text{Be}$ ، ${}^{7}\text{Be}$ ، ${}^{9}\text{Be}$)، لیتیوم (${}^{7}\text{Li}$ ، ${}^{6}\text{Li}$)، هلیوم (${}^4\text{He}$ ، ${}^3\text{He}$)، هیدروژن (${}^1\text{H}$ ، ${}^2\text{H}$)، نوترون، گاما، الکترون، پوزیترون و نوترینو می باشد. همچنین علاوه بر مدهای واپاشی قبلی (معادلات ۱ و ۲) یک مد واپاشی دیگر نیز برای برهمکنش هلیوم هلیوم در انرژی های بالا به صورت معادله ۳ معرفی شده است. در ضمن با توجه به گسیل ذرات نوترون و گاما با انرژی مختلف برخورد ذرات آلفا با آلفا (به طور مثال انرژی های 0.41 MeV و 1.98 MeV در انرژی برخوردی 40 MeV آلفا با آلفا)، می توان از آشکارسازی آن ها برای آشکارسازی ذرات آلفا پر انرژی استفاده کرد.

۵- مراجع:

۱. Wheeler M. Helium: The Disappearing Element. Springer; ۲۰۱۵.
۲. Kirshner RP. The earth's elements. Scientific American. ۱۹۹۴ Oct ۱;۲۷۱(۴):۵۸-۶۵.
۳. Cziráki Á. Stability of Nuclei Based on the New Proton and Neutron Model. Natural Science. ۲۰۲۳ Nov ۲۹;۱۵(۱۲):۲۸۹-۹۹.
۴. Kanungo R, Tanihata I, Ozawa A. Observation of new neutron and proton magic numbers. Physics Letters B. ۲۰۰۲ Feb ۲۸;۵۲۸(۱-۲):۵۸-۶۴.
۵. Bao M, He Z, Zhao YM, Arima A. Empirical formulas for nucleon separation energies. Physical Review C—Nuclear Physics. ۲۰۱۳ Apr;۸۷(۴):۰۴۴۳۱۳.
۶. Long Y, Jinsong P. Discusses the Relationship Between the First Excitation Energy of the Nucleus and the Magic Number. InEAI International Conference, BigIoT-EDU ۲۰۲۲ Jul ۲۹ (pp. ۵۴۶-۵۵۶). Cham: Springer Nature Switzerland.
۷. Laoutaris A, Nanos S, Biniskos A, Passalidis S, Benis EP, Dubois A, Zouros TJ. Projectile excitation to autoionizing states in swift collisions of open-shell He-like ions with helium. Physical Review A. ۲۰۲۴ Mar;۱۰۹(۳):۰۳۲۸۲۵.
۸. Tout CA. The triple- α process and the origin of the elements. Contemporary physics. ۲۰۰۶ May ۱;۴۷(۳):۱۴۵-۵۵.
۹. Soukeras V & et al. Revisiting the ${}^4\text{He}$ (${}^4\text{He}$, ${}^4\text{He}$) ${}^4\text{He}^*$ inelastic scattering at the MAGNEX facility. InJournal of Physics: Conference Series ۲۰۲۳ Sep ۱ (Vol. ۲۵۸۶, No. ۱, p. ۰۱۲۰۳۳). IOP Publishing.
۱۰. Soukeras V& et al. Study of the ${}^4\text{He}$ (${}^4\text{He}$, ${}^4\text{He}$) ${}^4\text{He}^*$ inelastic scattering at the MAGNEX facility. InEPJ Web of Conferences ۲۰۲۱ (Vol. ۲۵۲, p. ۰۴۰۰۷). EDP Sciences.
۱۱. Guessoum N, Kazanas D. Lithium Production in Companions of Accreting X-Ray Binaries by Neutron Spallation of C, N, O Elements. The Astrophysical Journal. ۱۹۹۹ Feb ۱۰;۵۱۲(۱):۳۳۲.



۱۲. Hassanpour M & et al. Monte Carlo simulation of spallation fragments cross-sections and yield for proton beam interaction with ^{222}Rn . Alexandria Engineering Journal. ۲۰۲۴ Jan ۱۵۷:۶۵۲-۶۱.
۱۳. Rezaie M, Valizadeh B, Heydarizade Y, Dehghanipour P. Monte Carlo investigation the effect of radon pollution on hair structure in Tehran city. Pollution. ۲۰۲۴ Dec ۲۲.
۱۴. Larsson E. Dosimetrical studies on a tissue level using the MCNP۴c۲ Monte Carlo Simulations
۱۵. Nouraddini-Shahabadi A & et al. Monte Carlo investigation of secondary particles production in soft tissue during carbon ion therapy by GEANT۴ toolkit and MCNPX Code. Radiation Physics & Engineering. ۲۰۲۳ Oct ۱;۴(۴).
۱۶. Khezripour S & et al. Investigating the hard X-ray production via proton spallation on different materials to detect elements. PloS One. ۲۰۲۳ Aug ۱۸;۱۸(۸):e۰۲۸۸۲۸۷.



محاسبه پارامترهای تابع GEB به منظور شبیه سازی طیف EU-152 در آشکارساز HPGe و

ارزیابی طیف شبیه سازی شده (کد مقاله : ۱۳۰۰)

قنواتی، سارا^۱- میرزایی، محمد^۲- باباپور مفرد، فرشید^۳- حدادی، اصغر^۴

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

۴- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

آشکارسازهای HPGe به دلیل دقت بالا، زمان مرده کم و قابلیت سازگاری با محیط های مختلف در صنایع پزشکی و هسته ای بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. توانایی آن در تشخیص و اندازه گیری دقیق پرتوهای گاما امکان شناسایی دقیق و تعیین کمیت ایزوتوپ های رادیواکتیو در نمونه های مختلف را فراهم می کند. محققان از شبیه سازی ها برای درک و بهینه سازی عملکرد آشکارساز استفاده می کنند. در این مطالعه با محاسبه پارامترهای a ، b و c که پهنای کامل در نیمه حداکثر (FWHM) را در تابع GEB MCNP تعیین می کنند، مدل سازی آشکارساز HPGe برای پرتوهای گاما با انرژی کم تا متوسط (۱۰۰-۱۵۰ KeV) انجام شد و اعتبارسنجی آن با استفاده از طیف Eu-۱۵۲ که به منظور کالیبراسیون آشکارساز HPGe مورد استفاده قرار می گیرد، صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، طیف شبیه سازی شده تطابق خوبی با طیف تجربی نشان داد که بیانگر پاسخ دقیق آشکارساز HPGe به برهمکنش های پرتو گاما و محاسبه دقیق پارامترهای تابع GEB می باشد.

کلمات کلیدی: آشکارساز HPGe، طیف سنجی، اشعه گاما، MCNP، طیف آزمایشگاهی، GEB

Calculation of GEB function parameters to simulate the EU-152 spectrum in the HPGe detector and evaluation of the simulated spectrum

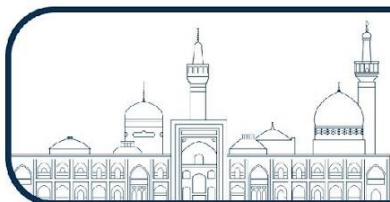
^۱ Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^۲ Atomic Energy Organization of Iran

^{۳,۴} Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract:

HPGe detectors are widely used in medical and nuclear industries due to their high precision, low dead time, and adaptability to various environments. Their ability to accurately detect and measure gamma rays enables precise identification and quantification of radioactive isotopes in various samples. Researchers use simulations to understand and optimize the detector's performance. In this study, by calculating the parameters a , b , and c which determine the Full Width at Half Maximum (FWHM) in the MCNP GEB function, modeling of the HPGe detector for low to medium energy gamma rays was conducted, and its validation was performed using the Eu-152 spectrum, which is used for calibrating the HPGe detector. Based on the obtained results, the simulated spectrum showed good agreement with the experimental spectrum,



indicating the accurate response of the HPGe detector to gamma ray interactions and the precise calculation of the GEB function parameters.

Key words: HPGe detector, spectrometry, gamma-ray, MCNP, experimental spectrum, GEB

۱- مقدمه:

آشکارساز HPGe به دلیل حساسیت بالا و قدرت تفکیک انرژی عالی نقش مهمی در طیف سنجی ایفا می کند. توانایی آن در تشخیص و اندازه گیری دقیق پرتوهای گاما امکان شناسایی دقیق و تعیین کمیت ایزوتوپ های رادیواکتیو در نمونه های مختلف را فراهم می کند. اهمیت آشکارساز HPGe در طیف سنجی در توانایی آن برای ارائه اطلاعات دقیق در مورد توزیع انرژی پرتوهای گاما ساطع شده از منابع رادیواکتیو نهفته است. این امر محققان و دانشمندان را قادر می سازد تا ویژگی های فرآیندهای فروپاشی هسته ای را مطالعه کنند، نمونه های محیطی را برای ایزوتوپ های رادیویی تجزیه و تحلیل کنند و اندازه گیری های دقیقی را در زمینه هایی مانند پزشکی هسته ای، نظارت بر محیط زیست و علم مواد انجام دهند.

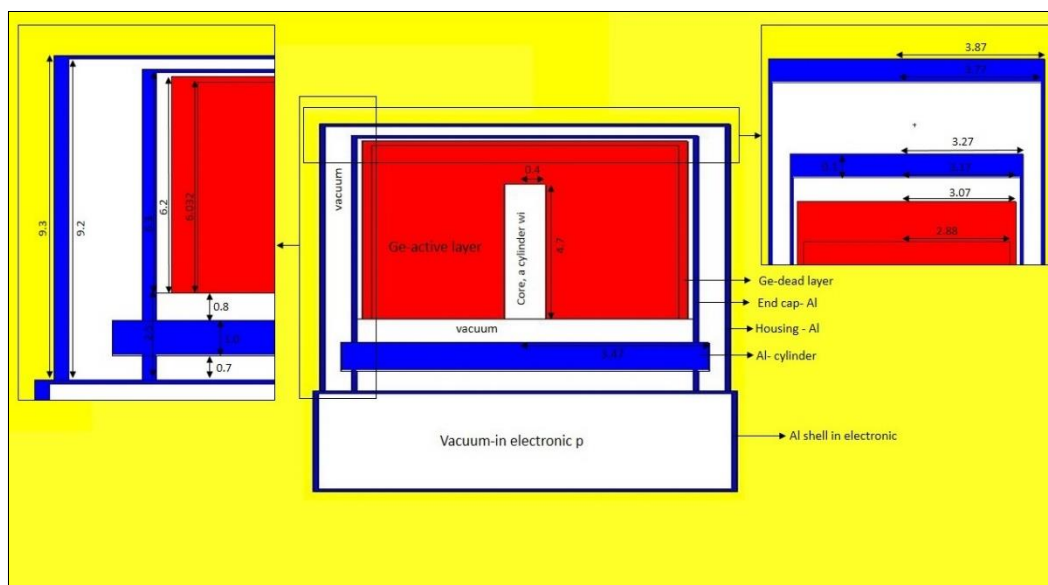
آشکارسازهای مختلفی برای طیف سنجی اشعه گاما، همراه با تکنیک های الکترونیکی و تجزیه و تحلیل داده ها، برای شناسایی و اندازه گیری پرتوهای گامای ساطع شده از منابع رادیواکتیو استفاده می شود. در میان آشکارسازهای مورد استفاده، آشکارسازهای HPGe دارای قدرت تفکیک انرژی بسیار خوبی هستند که آنها را برای طیف سنجی دقیق پرتو گاما مناسب می کند. تکنیک مونت کارلو به طور گسترده در زمینه های مرتبط با تشعشعات مانند تحقیقات پزشکی و صنعتی، حفاظت در برابر تشعشع و تاسیسات هسته ای استفاده می شود. این ابزار با تسهیل ساخت هندسه ها، استفاده از آشکارسازها و منابع انرژی مختلف به توسعه پروژه کمک می کند. در نتیجه، چالش های مرتبط با در دسترس بودن آشکارساز، منابع تشعشع، و آزمایش های تجربی را برطرف می کند، زیرا نیاز به تنظیمات آزمایشی را از بین می برد. بنابراین، استفاده از یک مدل سازی مناسب که به خوبی با نتایج تجربی همسو باشد بسیار مهم است. فقط تعداد محدودی از مطالعات به استفاده از آشکارسازهای ژرمانیوم در محدوده انرژی کم و متوسط (۱۵۰-۱۰۰ KeV) پرتوهای گاما می پردازند، که یک جنبه مهم در حوزه تجزیه و تحلیل فعال سازی است [۱-۳].

در این راستا، این تحقیق با هدف ارائه روشی برای مدل سازی آشکارسازهای HPGe با استفاده از کد MCNP با استفاده از چشمه ^{152}Eu که برای کالیبراسیون این آشکارسازها در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، به دست آوردن تابع پاسخ دقیق HPGe برای ایجاد یک شبیه سازی نزدیک به واقعیت، دنبال شد.

۲- روش کار:

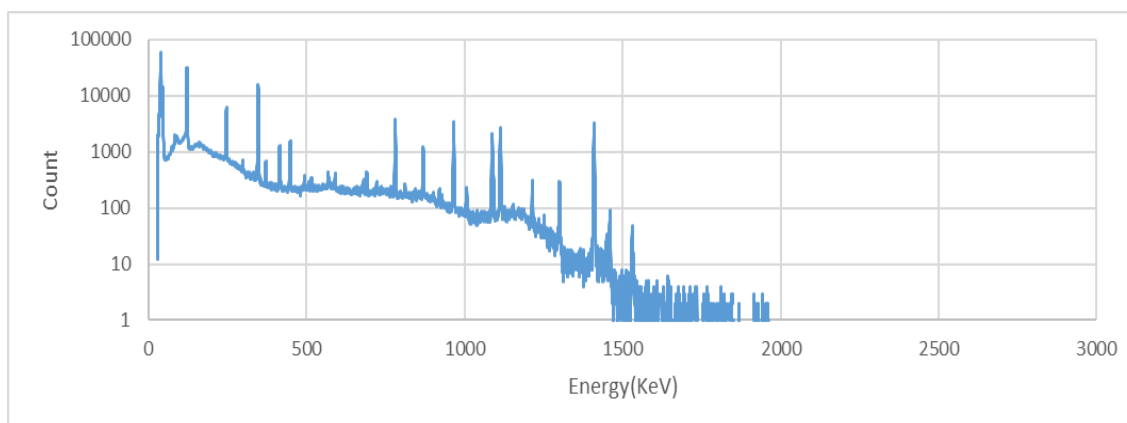
در این تحقیق، آشکارساز HPGe با استفاده از کد MCNP، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شبیه سازی شده است. آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا کوآکسیال نوع N ($^{20}\text{NIGC-40}$) (HPGe) همراه با یک سیستم تحلیلگر چند کاناله ($^{1040\text{-NIGC}}$, DSG, GMBH). قطر کریستال آشکارساز ۶۱.۴ میلی متر و طول آن ۶۲ میلی متر است. علاوه بر این، دارای یک لایه مرده ۰.۳ میکرون Ge/B و یک لایه مرده ۷۰۰ میکرون Ge/Li است. همچنین از الکترونیک استاندارد و یک تحلیلگر چند کاناله با ۴۰۹۶ کانال استفاده شد. وضوح (FWHM) در ۱.۳۳ MeV، ^{60}Co و نسبت پیک به کامپتون، ^{60}Co ۵۴:۱ و بازده نسبی در ۱.۳۳ MeV، ^{60}Co ۴۰٪ است. برنامه GammaVision-، برنامۀ

۷ برای طیف سنجی گاما استفاده شد. چشمه استاندارد ^{152}Eu با نیمه عمر ۱۳.۵۱۷ سال، حجم ۸ سی سی و فعالیت ۲.۲۱ میکروکوری در فاصله ۲۰ سانتی متری از آشکارساز HPGe قرار دارد.



شکل ۱. هندسه و ابعاد آشکار ساز HPGe شبیه سازی شده

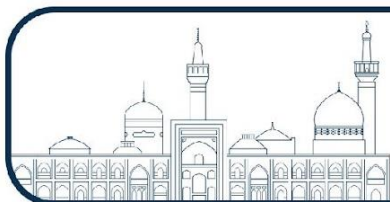
پس از انجام آزمایش، طیف تجربی Eu-^{152} به دست آمد (شکل ۲). با استفاده از این طیف، مقادیر FWHM برای هر یک از ۱۱ پیک Eu-^{152} با استفاده از نرم افزار Origin محاسبه شد و جدول ۱ مقادیر FWHM را به عنوان تابعی از انرژی برای هر قله نشان می دهد.



شکل ۲. طیف واقعی بدست آمده از Eu-25 در آشکارساز HPGe

جدول ۱. FWHM محاسبه شده از پیک های طیف واقعی

Peak Energies (keV)	FWHM(keV)
121/7817	1/99134
244/6975	2/0.8782



۳۴۴/۲۷۸۵	۲/۱۰۰۴۹
۴۱۱/۱۱۶۳	۲/۰۵۲۴۳
۴۴۳/۹۶۵	۲/۱۶۳۸۸
۷۷۸/۹۰۴	۲/۳۰۵۵۲
۸۶۷/۳۷۸	۲/۳۰۴۶۶
۹۶۴/۰۷۹	۲/۴۲۶۲
۱۰۸۵/۸۶۹	۲/۶۰۵۷۶
۱۱۱۲/۰۷۴	۲/۴۸۵۰۳
۱۴۰۸/۰۰۶	۲/۶۸۶۴۹

در زمینه شبیه‌سازی‌های مونت کارلو با استفاده از کد MCNP، گسترش انرژی گاوسی (GEB) به عنوان یک تکنیک تخصصی برای پردازش آمار عمل می‌کند. هدف آن تقویت شبیه‌سازی آشکارسازهای تشعشع فیزیکی است، به‌ویژه آن‌هایی که پیک‌های انرژی در آن‌ها گسترش انرژی گاوسی را نشان می‌دهند. برای اعمال GEB، یک کارت "FTn" در فایل ورودی MCNP قرار داده می‌شود. سپس مقادیر انرژی محاسبه شده با نمونه برداری از یک توزیع گاوسی گسترش می‌یابد: [۴]

$$(۱) f(E) = Ce^{-(E-E_0/A)^2}$$

در جایی که E انرژی گسترش یافته است، E_0 انرژی در ارتفاع بیشینه، C یک ثابت عددی است، و A عرض گاوسی است. با در نظر گرفتن محاسبه عرض کامل در نیمه حداکثر (FWHM) از طریق معادله ۲ و رابطه بین FWHM و انرژی، پارامترهای a ، b و c را می‌توان از طریق رابطه ۳ به دست آورد.

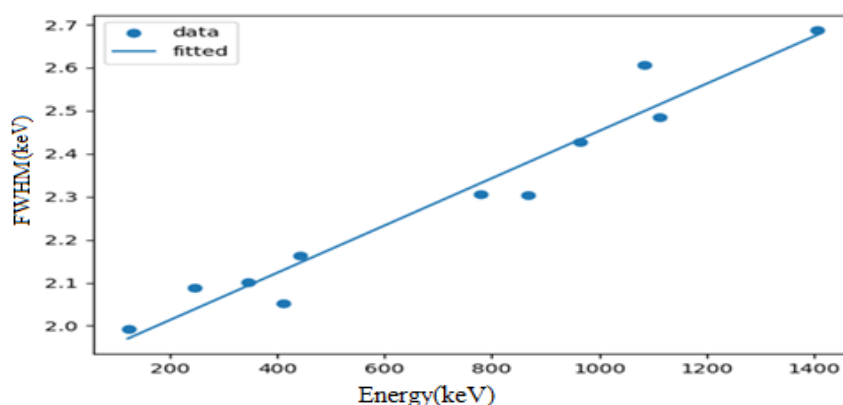
$$(۲) A = \frac{FWHM}{2\sqrt{\ln 2}}$$

$$(۳) FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2}$$

شکل ۳ نمودار FWHM را به عنوان تابعی از انرژی با توجه به داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که برای بدست آوردن پارامترهای a ، b و c (جدول ۲) برای استفاده در دستور GEB MCNP استفاده می‌شود.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای a ، b و c

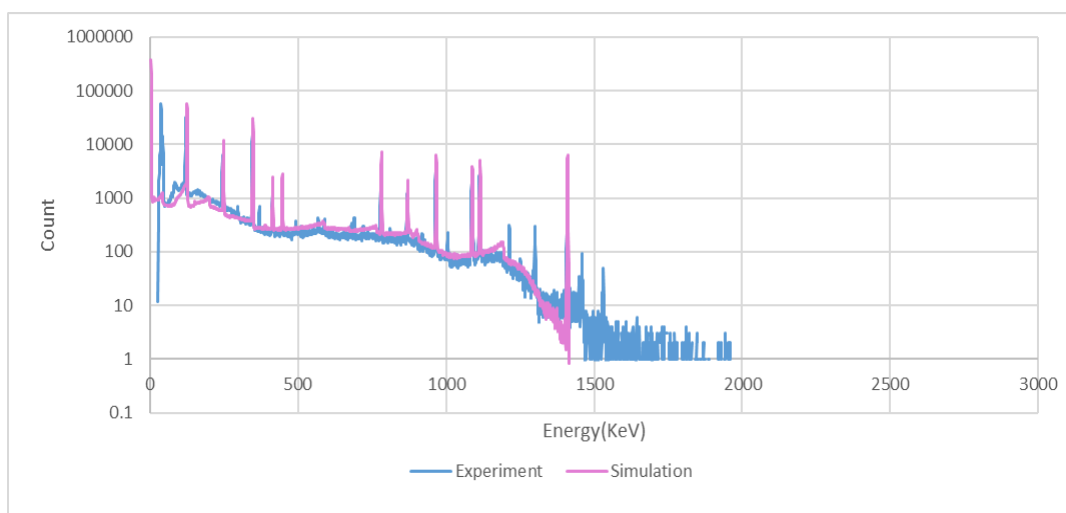
a	b	c
۱.۹۰۳۴۵۲۷۲۰۹	۰.۰۰۰۶۲۱۶۴۵۱۸۱۷	۰.۷۷۹۰۸۶۱۳۳۶۴۹



شکل ۳. نمودار FWHM به عنوان تابعی از انرژی (KeV)

۳- نتایج:

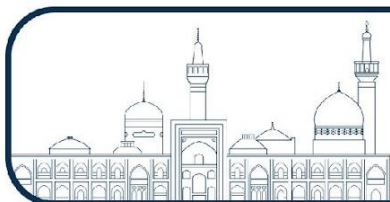
تابع پاسخ HPGe به چشمه استاندارد پرتو گاما ^{152}Eu به طور تجربی اندازه‌گیری شد و با نتایج شبیه‌سازی شده برای اعتبارسنجی مقایسه شد. شکل ۴ یک توافق مطلوب بین طیف آزمایشگاهی و طیف شبیه‌سازی شده را در محدوده انرژی ۱۱ قله فوتوالکتریک در طیف پرتو گاما ^{152}Eu نشان می‌دهد. علیرغم این توافق کلی، اختلافات جزئی ممکن است ناشی از عواملی مانند تشعشعات پراکنده از مواد اطراف در اتاق، جمع‌آوری ناقص بار، انباشته شدن پالس ناشی از نویز الکترونیکی باشند. [۵،۶].



شکل ۴. مقایسه بین طیف آزمایشگاهی و طیف شبیه‌سازی شده از چشمه نقطه‌ای ^{152}Eu

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

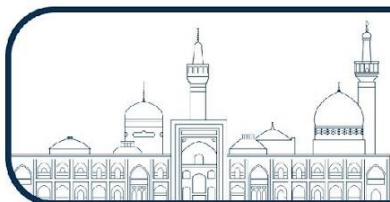
شبیه‌سازی آشکارساز می‌تواند ابزارهای مؤثری برای تعیین دقیق عملکرد پاسخ آشکارساز، غلبه بر چالش‌هایی مانند کمبود منابع تابشی با انرژی‌های فوتون لازم ارائه دهد. این مطالعه روشی را برای شبیه‌سازی توابع پاسخ HPGe با استفاده از GEB به عنوان



یک درمان خاص برای آمار در MCNPX معرفی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های MCNPX با استفاده از GEB با موفقیت با تمام قله‌های گاوسی که از منابع استاندارد پرتو گاما سرچشمه می‌گیرند در یک محدوده انرژی گسترده با اختلافات جزئی مطابقت می‌دهند. در این مطالعه، به عنوان بخشی از تلاش‌های آینده ما، ضرایب a ، b و c ، همانطور که در بالا توضیح داده شد، استخراج شده‌اند تا کتابخانه‌ای برای تجزیه و تحلیل اکتیویته فوتون‌های گاما با استفاده از کد مونت کارلو ایجاد شود. توجه به این نکته مهم است که پارامترهای GEB برای هر پیکربندی از تنظیمات آزمایشی متفاوت است.

۵- مراجع:

- [۱] Rahman, M. S., & Cho, G. (۲۰۱۰). HPGe detector energy response function calculation up to ۴۰۰ keV based on Monte Carlo code. Journal of scientific research, ۲(۳), ۴۷۹.
- [۲] Lépy, M. C., Plagnard, J., & Ferreux, L. (۲۰۰۳). Study of the response function of a HPGe detector for low-energy X-rays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۵۰۵(۱-۲), ۲۹۰-۲۹۳.
- [۳] Kojima, Y., Ikuta, T., Asai, M., Taniguchi, A., Shibata, M., Yamamoto, H., & Kawade, K. (۱۹۹۷). Measurement of response functions of HPGe detectors for monoenergetic electrons and positrons in an energy range of ۶,۰-۹,۰ MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۱۲۶(۱-۴), ۴۱۹-۴۲۲.
- [۴] Pelowitz, D. B. (۲۰۰۵). MCNPXTM user's manual. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, ۵, ۳۶۹.
- [۵] Pylypchynets, I., Lengyel, A., Parlag, O., Maslyuk, V., & Potoki, I. (۲۰۱۹). Empirical formula for the HPGe-detector efficiency dependence on energy and distance. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, ۳۱۹, ۱۳۱۵-۱۳۱۹.
- [۶] El Abd, A., Mostafa, M., & El-Amir, M. (۲۰۱۲). Production of ۱۵۲,۱۵۴ Eu mixed sources for calibrations of gamma-ray spectrometers. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, ۲۹۳(۱), ۲۵۵-۲۶۰.



ارزیابی عملکرد حفاظتی میکروذرات و نانوذرات اکسید تنگستن برای اشعه ایکس تشخیصی به صورت تجربی و شبیه‌سازی با ابزار GEANT4 (کد مقاله : ۱۳۰۸)

آثاری شیک، نادیا* - رفیعی پور، پیمان^۲ - خوشحال، امیررضا^۳

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده:

در کنار کاربرد اصلی اشعه ایکس در حوزه پزشکی، این پرتو به عنوان یکی از تشعشعات یونیزان شناخته می‌شود که محافظت در برابر آن موثرترین روش مدیریت ایمنی است. ترکیب علم نانو و حفاظ‌گذاری در برابر پرتوها، چشم‌انداز جدیدی را در زمینه حفاظت در برابر اشعه ایجاد کرده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج تجربی، جهت شبیه‌سازی از ابزار مونت کارلو $GEANT^4$ بهره گرفته شد. پس از تهیه WO^3 بصورت نانوذرات و میکروذرات و آماده‌سازی نمونه‌های پلیمری، پرتودهی تحت تابش ایکس با چهار انرژی در محدوده تشخیصی و همچنین مقایسه پارامترهای ضریب تضعیف خطی، لایه نیم‌جذب و درصد تضعیف به صورت تجربی و شبیه‌سازی مشاهده شد که بین خواص حفاظی نانوذرات و میکروذرات WO^3 تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و در ولتاژهای بالاتر، نتایج شبیه‌سازی و تجربی به هم نزدیکتر می‌شود. به طور کلی، ابزار مونت کارلو $GEANT^4$ عملکرد بسیار خوبی برای شبیه‌سازی مسائل مربوط به حفاظ‌سازی در مقیاس میکرو و به ویژه نانو دارد.

کلمات کلیدی: اشعه ایکس تشخیصی، حفاظ‌گذاری، شبیه‌سازی مونت کارلو، نانو ذره، تنگستن اکسید.

Investigation of the Shielding Performance of Micro- and Nano- WO^3 for Diagnostic X-rays by Experimental and Geant⁴ Simulation

AsariShik, Nadia ^{۱*}, Rafiepour, Payman ^۲, Khoshhal, Amir Reza^۳

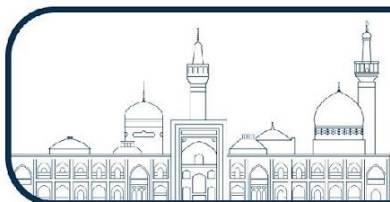
^۱. Department of Physics, School of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

^۲. Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

^۳. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

In addition to its main application in medicine, X-rays are known as one of the ionizing radiations, against which protection is the most effective safety management method. The combination of nanotechnology and radiation protection has created a new perspective in the



field of radiation protection. In order to validate the experimental results, the GEANT⁴ Monte Carlo toolkit was used for simulation. After preparing WO₃ as nanoparticles and micro particles and preparing polymer samples, they were irradiated by four energies of X-rays in the diagnostic range. Comparing the experimental and simulation values of linear attenuation coefficient, half-value layer and attenuation percentage, it was observed that there is no significant difference between the shielding properties of WO₃ nanoparticles and micro particles. At higher voltages, the simulation and experimental results converge. Generally, the GEANT⁴ Monte Carlo toolkit has a very good performance for simulating the shields of micro and specifically nano scale

Key words: Diagnostic X-ray, Shielding, Monte Carlo Simulation, Nano-particle, WO₃

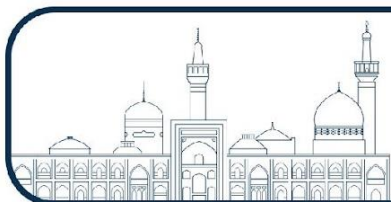
۱ - مقدمه:

کاربردی ترین بخش تابش الکترومغناطیسی در پزشکی، پرتوهای یونیزان هستند که در حوزه تشخیصی، اشعه ایکس در مرکز توجه و تمرکز قرار دارد. در این مورد، در سال ۲۰۱۰ توسط بیش از ۳ میلیارد مواجهه تشخیصی توسط سازمان ملل بود گزارش شده بود [۱] که به طور مداوم در حال افزایش است. اشعه ایکس یک تشعشع یونساز است که می تواند به بافت های زنده، سلول ها و حتی ساختار DNA به عنوان حیاتی ترین بخش بیولوژیکی آسیب برساند. از آنجا که اطلاعات ژنتیکی توسط DNA ذخیره و منتقل می شود، بنابراین ناهنجاری آن باعث جهش ژنتیکی یا سرطان می گردد [۲]. فعالیت های مدیریت ایمنی مختلفی که برای کاهش چنین آسیب هایی مطرح شده شامل کاهش زمان قرار گرفتن در معرض پرتو، افزایش فاصله منبع-هدف و حفاظ گذاری است که در بین روش های فوق، موثرترین روش، توجه به عملکرد حفاظ بوده است [۳]. بر اساس مفاهیم فیزیکی، عناصر با عدد اتمی بالا (Z) لبه جذب بالاتری دارند و می توانند برای حفاظ گذاری پرتوهای X تشخیصی مؤثرتر باشند [۴]. ویژگی های مختلف سرب (Z=۸۲=Pb) مانند انعطاف پذیری، نقطه ذوب نسبی کم، فراوانی و هزینه کم، انتخاب سرب را به عنوان بهترین انتخاب محافظ برای مدت های طولانی افزایش داد [۴،۵]. اما از آنجا که مضرات متعددی برای تماس مداوم با سرب مطرح شده است [۷]، یافتن جایگزین مناسب برای سرب، مورد توجه قرار گرفت و تنگستن (W) به دلایل متعددی همچون Z بیشتر از سرب و میزان سمیت به مراتب کمتر نسبت به سرب به عنوان یک گزینه مطرح شد [۴،۵]. از سوی دیگر، کشف فناوری نانو بر حوزه های مختلف علم تأثیر گذاشت. حوزه حفاظت در برابر اشعه نیز تحت تأثیر انقلاب علم نانو قرار گرفت و پژوهش های متعددی در زمینه حفاظ گذاری با استفاده از مواد نانو انجام گرفت [۷،۸]. اکثر این تحقیقات نتایج تضعیف بالاتر را با استفاده از نانومواد تایید کردند [۹،۱۰]. علاوه بر این، شبیه سازی و مطالعات تجربی مکمل یکدیگر هستند. بنابراین، شبیه سازی نقش مهمی را در تحقیقات علمی ایفا می کند. یکی از مهمترین و پرکاربردترین ابزار شبیه سازی به روش مونت کارلو، ابزار GEANT⁴ [۱۱] می باشد که می تواند انتقال ذرات را در مقیاس های نانو و میکرو شبیه سازی کند. بنابراین برای شبیه سازی در این تحقیق از آن استفاده می شود.

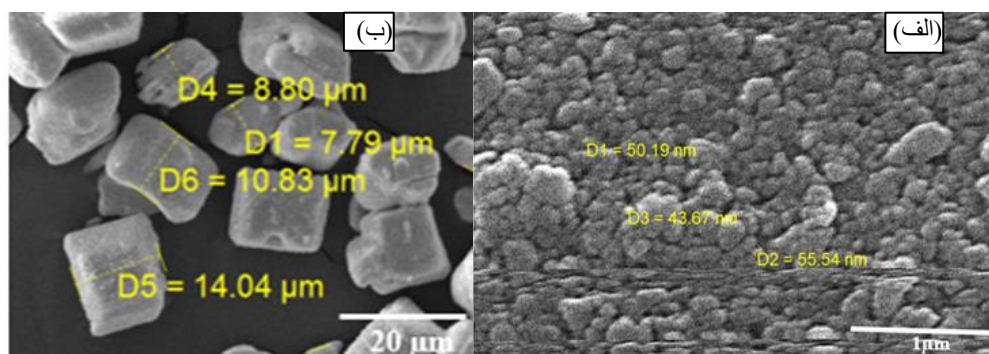
۲ - روش کار:

۲-۱- کار تجربی و روابط تئوری

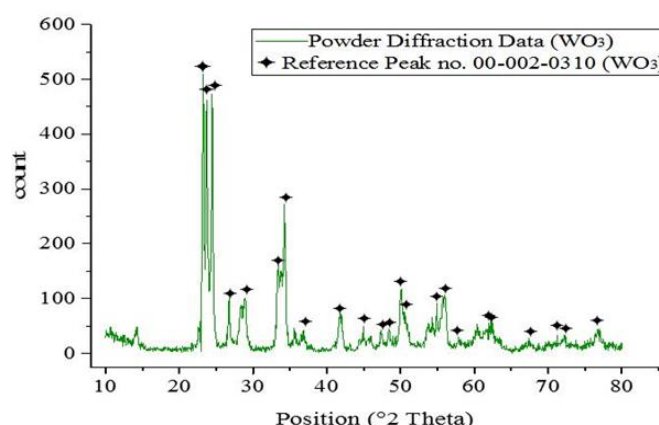
به منظور بررسی تجربی، فرآیند سنتز نانوذرات بیسموت براساس روش هیدروترمال [۱۲] انجام شد و میکروذرات WO₃ از شرکت آلدریچ، خریداری گردید. لازم به ذکر است که میکروذرات دانه های ماسه گون داشت و به صورت پودر نبود. بررسی های



مشخصه‌یابی مورفولوژیکی نانو و میکرو ذرات با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌های پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد که در شکل ۱ و ۲ به ترتیب تصاویر SEM و طیف XRD را نشان داده شده‌اند [۱۳]. با تهیه تصویر SEM این نمونه‌ها مشخص شد که ابعاد میکروذرات در محدوده ۵-۱۵ μm می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، اندازه متوسط نانوذرات حدود ۵۰ nm می‌باشد.



شکل (۱) تصویر SEM از (الف) نانوذرات WO_3 و (ب) میکروذرات WO_3 .

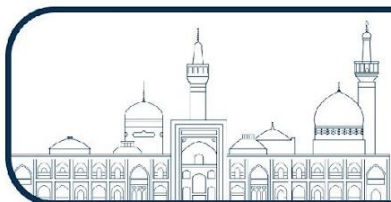


شکل (۲) طیف XRD نانوذرات WO_3 .

بستر پلیمری استفاده‌شده شامل ۴۰٪ وزنی پلی وینیل کلراید (PVC، پتروشیمی اروند، ایران) و ۴۰٪ وزنی روغن DOP (شرکت جهان گرانول، ایران) می‌باشد که ۲۰٪ وزنی از نانو یا میکرو ذرات آماده شده به پلیمر اضافه شد تا صفحات حفاظ با یک ضخامت حدود ۱ mm آماده گردد. پرتوهای تجربی توسط لامپ پرتو X (واریان، امریکا) در چهار انرژی قطع ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلو ولت و با اعمال جریان ۱۰ mA انجام شد. از یک فیلتر آلومینیومی ۳ mm برای حذف فوتون‌های کم انرژی بهره گرفته شد. داده‌ها توسط دزیمر کالیبره شده Pirhana (سوئد) و نرم‌افزار Ocean [۱۳] ثبت شد. فاصله چشمه تا نمونه ۱ متر تنظیم گردید.

طبق قانون Lambert-Beer، تضعیف اشعه ایکس به پارامترهای مختلفی مانند شدت اولیه (I_0)، ضریب تضعیف خطی (μ) و ضخامت حفاظ (x) بستگی دارد. بنابراین، شدت اندازه‌گیری شده (I) را می‌توان با فرمول Lambert-Beer [۱۳] تعیین نمود:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$



ضریب تضعیف خطی پارامتر مناسبی برای نشان دادن قابلیت حفاظی یک ماده به ویژه برای مقایسه نمونه‌هایی با چگالی تقریباً یکسان است. با استفاده از اصل ارشمیدس، چگالی نمونه‌ها به صورت تجربی تعیین شد که برای پلیمر حاوی نانوذرات و میکروذرات ۳WO به ترتیب 3.106 g/cm^3 و 3.12 g/cm^3 به دست آمد [۱۳]. طبق رابطه ۲، ضریب تضعیف خطی با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

لایه نیم جذب^{۸۲} (HVL) ضخامتی از حفاظ است که شدت پرتو به نصف مقدار اولیه کاهش می‌دهد. با توجه به معادله ۳ می‌توان HVL را به صورت زیر محاسبه کرد

$$HVL \text{ (cm)} = \frac{0.693}{\mu} \quad (3)$$

درصد تضعیف (AP) یک نمونه با معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$AP(\%) = \frac{D_0 - D}{D_0} * 100 \quad (4)$$

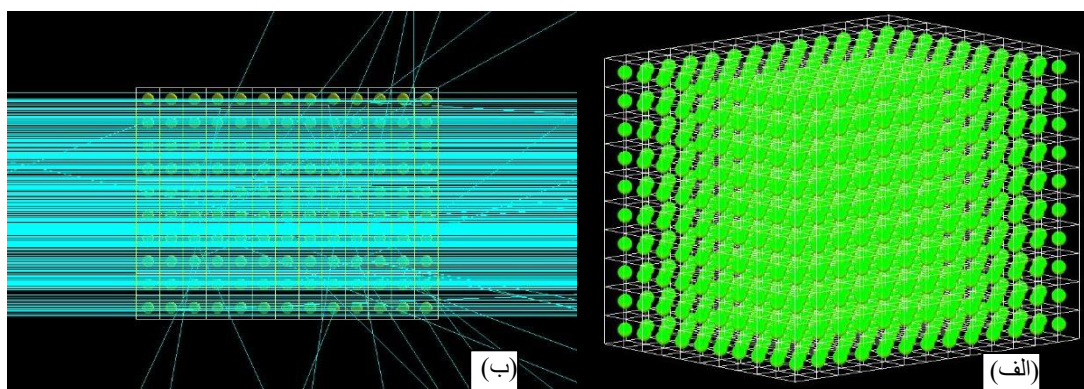
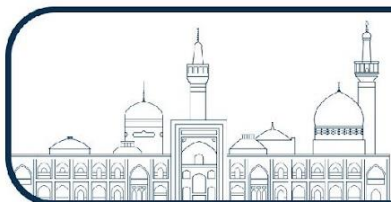
شبه‌سازی ۱-۱

یکی از قابلیت‌های ابزار شبه‌ساز ۴GEANT، توانایی ساختارهای میکرو و نانو با دقت بالا است. برای تطابق شرایط تجربی و شبه‌سازی، پارامترهای اصلی بخش تجربی مانند اندازه ذرات ۳WO، چگالی نمونه‌ها، درصد وزنی اجزای حفاظ و فاصله منبع تا نمونه در شبه‌سازی لحاظ شد. هر کدام از میکروذرات و نانوذرات ۳WO به شکل یک کره ساده، به عنوان پرکننده، در داخل یک مکعب کوچک از پلیمر تعریف شدند. سپس با چینش تعداد زیادی از وکسل‌ها در کنار هم، نمونه به طور کامل توسط نانوذرات پر شدند. شعاع هر کره و ضلع هر مکعب حامل آن کره و در نتیجه تعداد کل نانوذرات موجود در نمونه بسته به غلظت مورد نظر متفاوت است. از معادله (۱) برای تعریف غلظت پرکننده‌ها بر حسب درصد وزنی ماتریس استفاده می‌شود:

$$Concentration \text{ (wt. \%)} = \frac{\rho_f \times V_f}{\rho_v \times V_v} \times 100 \quad (1)$$

که در آن ρ و V به ترتیب چگالی و حجم هم برای پرکننده (f) و هم برای وکسل دربردارنده آن (v) هستند. با تنظیم درصد غلظت برابر با ۲۰٪، نسبت حجمی پرکننده به یک وکسل حامل آن و در نتیجه با تکثیر کامل آن در نمونه، نسبت حجمی پرکننده به کل پلیمر مطابق با رابطه ۱ به دست می‌آید. شکل ۳ نمایی از هندسه میکروذرات شبه‌سازی شده در ۴GEANT را به نمایش گذاشته است.

^{۸۲} Half value layer

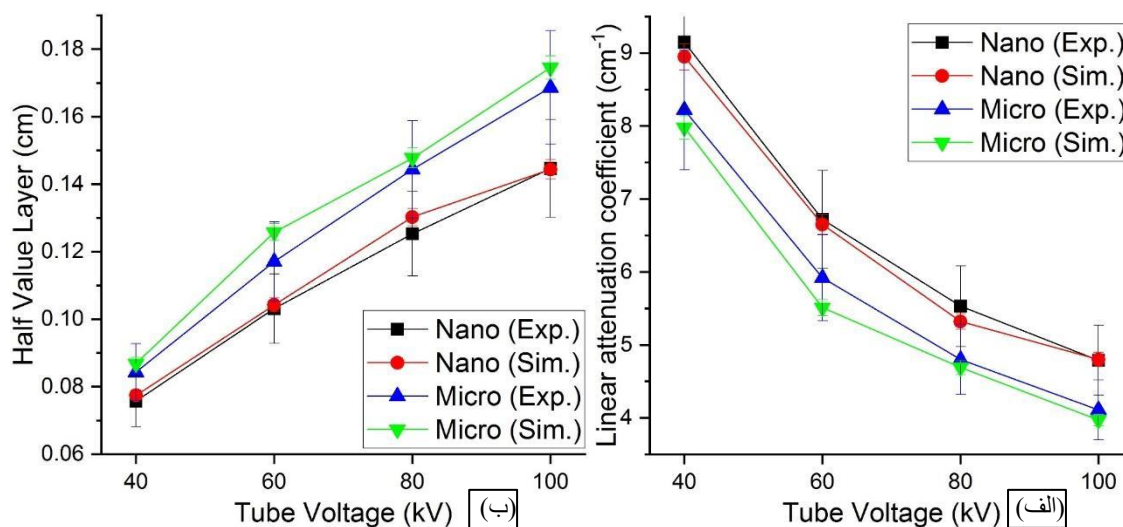


شکل (۳) (الف) شبیه‌سازی پرکننده‌های WO_3 (کره‌های سبز) درون پلیمر. (ب) نمایی از عبور فوتون‌ها از نمونه.

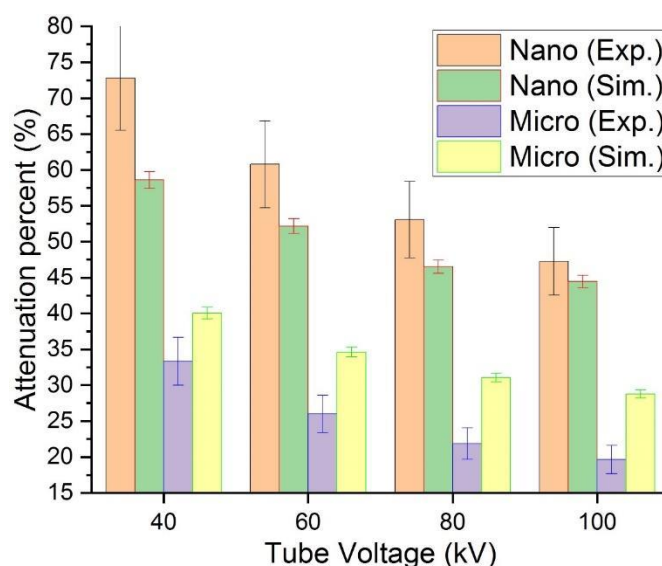
۳- نتایج:

شکل ۴-الف و ۴-ب به ترتیب ضرایب تضعیف خطی (رابطه ۲) و همچنین HVL (رابطه ۳) نمونه‌ها را در انرژی‌های قطع کیلوولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. میله‌های خطا در بخش تجربی ۱۰٪ و در شبیه‌سازی حداکثر ۲٪ است.

شکل ۵ نیز میزان درصد تضعیف نمونه‌ها را بر اساس رابطه ۴ نشان می‌دهد. میزان عدم قطعیت تجربی و شبیه‌سازی به ترتیب ۱۰٪ و ۲٪ است.



شکل (۴) (الف) ضریب تضعیف خطی و (ب) لایه نیم‌جذب‌کننده برای نمونه حاوی نانو و میکروذرات WO_3 .

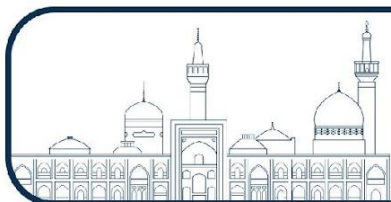


شکل (۵) درصد تضعیف نمونه‌ها برای اشعه ایکس. میزان عدم قطعیت تجربی و شبیه‌سازی به ترتیب ۱۰٪ و ۲٪ است.

۳- بحث و نتیجه گیری:

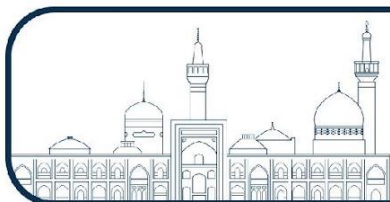
با توجه به شکل ۴-الف، بدیهی است که ضریب تضعیف با افزایش ولتاژ اعمال شده کاهش می‌یابد که نتایج به دست آمده در سایر پژوهش‌ها نیز این نتیجه را تأیید می‌کند [۵، ۱۳، ۱۴]. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های نانوذرات WO_3 دارای ضرایب تضعیف بالاتری نسبت به میکروذرات هستند. همانطور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، مقادیر تجربی HVL برای نمونه‌های حاوی نانوذرات WO_3 نتایج بهتری را نشان می‌دهد، یعنی ضخامت کمتر این نمونه‌ها منجر به کاهش ۵۰٪ در شدت اشعه ایکس می‌شود. اگرچه مقادیر HVL حفاظ‌های شبیه‌سازی شده برای نمونه‌های میکرو و نانو WO_3 به ترتیب ۰/۰۸۶۸ و ۰/۰۷۷۴ سانتیمتر در ۴۰ کیلوولت است، اما افزایش ولتاژ اعمالی، مقادیر HVL نمونه‌ها را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که در ۱۰۰ کیلوولت، مقدار HVL میکرو و نانوذرات WO_3 شبیه‌سازی به ۰/۱۶۸ و ۰/۱۴۴ سانتیمتر افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش ولتاژ باعث افزایش مقادیر HVL می‌شود. این نتیجه با کلیت نتیجه گزارش شده در مراجع [۱۵، ۱۶] مطابقت دارد. مقایسه بخش‌های تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای نمونه‌های حاوی نانو WO_3 ، HVL دارای مقادیر نزدیک به هم است. بنابراین، شبیه‌سازی ۴GEANT مطابقت خوبی با مطالعات تجربی دارد. بنابراین، این روش شبیه‌سازی می‌تواند برای مطالعات نانوذرات بیشتر توسعه یابد.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای ولتاژهای کم، مطالعه تجربی نانوذرات دارای درصد تضعیف بیشتری است، اما با افزایش ولتاژ، درصد تضعیف شبیه‌سازی و تجربی به هم نزدیکتر می‌شوند. در مطالعه میکروذرات، نتایج، برتری کامل درصد تضعیف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و علت آن می‌تواند با ساختار شش‌گانه میکروذرات خریداری شده (که در مطالعه تجربی مورد استفاده قرار گرفت) مرتبط باشد. با این حال، تفاوت نتایج شبیه‌سازی و تجربی میکروذرات کمتر از ۱۰٪ است. به عنوان نتیجه‌گیری می‌توان گفت که پارامترهای مورد مطالعه برای نمونه‌های حاوی نانوذرات WO_3 مقادیر بهتری نسبت به میکروذرات دارند پس استفاده از نانوذرات WO_3 در حفاظ‌سازی توصیه می‌شود. علاوه بر این، نشان داده شد که ابزار ۴GEANT دارای قابلیت بسیار خوبی جهت شبیه‌سازی ترابرد ذرات در مقیاس‌های میکرو و نانو می‌باشد.



۴- مراجع:

- [۱] Gholamzadeh L, AsariShik N., "X-ray radiation shielding material, Advanced Radiation Shielding Materials", Elsevier Book, (۲۰۲۴), pp ۴۵-۷۳.
- [۲] Niu Sh et al. "Diagnostic and exposure criteria for occupational diseases", International Labour Organization, (۲۰۲۲), pp ۵۵۸-۵۶۶.
- [۳] Storm D., "Ten Principles and Ten Commandments of Radiation Protection", Health Phys (۱۹۹۶), ۷۰(۳): ۸۸-۹۳.
- [۴] McCaffrey JP, et al. "Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments", Med Phys, ۳۴, (۲۰۰۷), pp ۵۳۰-۵۳۷.
- [۵] M. R. Aghamiri et al. "A Novel Design for Production of Efficient Flexible Lead-Free Shields against X-ray Photons in Diagnostic Energy Range," J. Biomed. Phys. Eng., vol. ۱(۱), (۲۰۱۱), pp. ۱۷-۲۱.
- [۶] Mortazavi S.M.J, et al. "Lead-free, multilayered, and nanosized radiation shields in medical applications, industrial, and space research", Advanced Radiation Shielding Materials, Elsevier Book, (۲۰۲۴), pp ۳۰۵-۳۲۲.
- [۷] Thibeault S.A. et al. "Nanomaterials for radiation shielding", MSR Bulletin, vol. ۴۰, (۲۰۱۵), pp ۸۳۶-۸۴۱.
- [۸] Mesbahi. A. and Ghiasi.H., "Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro- and nano-particles against neutron and gamma radiations," Applied Radiation and Isotopes ۱۳۹, (۲۰۱۸), pp ۲۷.
- [۹] Nikeghbal K. et al, "Designing and Fabricating Nano-Structured and Micro-Structured Radiation Shields for Protection against CBCT Exposure". Materials ۱۳(۱۹), (۲۰۲۰), ۴۳۷۱.
- [۱۰] Agostinelli, S., Allison, J. et al. "GEANT^۴—a simulation toolkit", Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۵۰۶(۳), (۲۰۰۳), pp ۲۵۰-۳۰۳.
- [۱۱] Khajeh Amian M, Jinhua Ye; "Morphology influence on photocatalytic activity of tungsten oxide loaded by Pt nanoparticles", J. Mater. Res, (۲۰۱۰), ۲۵(۱).
- [۱۲] Asari-Shik N., Gholamzadeh L., "X-ray shielding performance of the EPVC composites with micro- or nanoparticles of WO₃, PbO or WO₃", Appl. Radiat. Isot. ۱۳۹, (۲۰۱۸), pp ۶۱-۶۵.
- [۱۳] L. Gholamzadeh, N. Asari-Shik, M.K. Aminian et al., "A study of the shielding performance of fibers coated with high-Z oxides against ionizing radiations", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A ۹۷۳ (۲۰۲۰) ۱۶۴۱۷۴.
- [۱۴] Asadpour N. et al. "Shielding performance of multi-metal nanoparticle composites for diagnostic radiology: an MCNPX and GEANT^۴ study", Radiological Physics and Technology, Vol ۱۲, (۲۰۲۳), pp ۵۷-۶۸.
- [۱۵] Al-Hadeethi Y., Sayyed M.I., Nune M., "Radiation shielding study of WO₃-ZnO-PbO-B₂O₃ glasses using GEANT^۴ and Phys-X: A comparative study", Ceramics International, (۲۰۲۰), ۴۷(۳).



روش اندازه گیری زمان مرده آشکارساز گایگر-مولر با استفاده از یک چشمه رادیواکتیو با

نیمه عمر بالا (کد مقاله : ۱۳۰۹)

آریافر، هانیه^۱ - اشرفی، صالح^۱

^۱ - دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

^۱ - پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی دانشگاه تبریز

چکیده:

آشکارسازهای گایگر-مولر به علت عملکرد پایدار و ارتفاع پالس بالا، از پرکاربردترین آشکارسازها محسوب می‌شوند. یکی از چالش‌های مهم در این شمارنده‌ها، زمان مرده آن‌ها ($\rho \sim 100 \mu s$) است که بر آهنگ شمارش تاثیر گذاشته و باعث انحراف شمارش‌ها از توزیع پواسون می‌شود. برای تصحیح این اثر روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است، از جمله روش دو چشمه که نیازمند دو چشمه کاملاً یکسان می‌باشد و همینطور روش واپاشی چشمه که معمولاً برای چشمه‌هایی با نیمه عمر کوتاه استفاده می‌شود. در این مقاله، روشی بر پایه یک چشمه رادیواکتیو با نیمه عمر بالا (مانند ^{3890}Sr با نیمه عمر ۲۸.۹ سال) پیشنهاد شده است. همچنین، از روش عددی برازش تابع غیرخطی^{۸۳} برای تعیین زمان مرده استفاده شده است. در این مطالعه، دو مدل ایوانز و مولر به کار گرفته شده‌اند و مقدار زمان مرده‌ی تمدید ناپذیر برای هر دو مدل یکسان و برابر با $\rho = 85,232 \mu s$ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که این مقدار تطابق خوبی با مقدار حاصل از روش دو چشمه دارد.

کلمات کلیدی: آشکارساز گایگر-مولر، زمان مرده، روش دو چشمه، روش واپاشی چشمه، برازش غیر خطی

The method for measuring the dead time of a G-M detector using a radioactive source with long half-life

Ariaifar, Haniyeh^{۱*}, Ashrafi, Saleh^۱

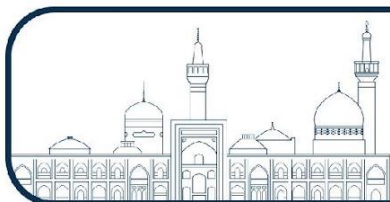
^۱. Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^۲. Research institute for Applied Physics & Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract:

G-M detectors are among the most widely used in radiation detectors due to their stable performance and high pulse amplitude. One of the major challenges in these counters is their dead time ($\rho \sim 100 \mu s$) which affects the count rate and causes deviation from Poisson distribution. Various methods have been proposed to correct this effect, including the two-source method, which requires two identical radiation sources and the source decay method,

^{۸۳} Nonlinear Curve Fitting



typically applied to sources with short half-life. In this study, a method based on a single radioactive source with a long half-life (such as ^{89}Sr with a half-life of 28.9 years) is proposed. Additionally, a numerical nonlinear function fitting approach has been employed to determine the dead time. Two models Evans and Muller, have been applied, yielding an identical non- extendable dead time of ($\rho = 85,232 \mu\text{s}$) for both models. The results demonstrate that this value obtained from the two-source method.

Key words: G-M Detector, Dead Time, Two Source Method, Decaying Source Method, Nonlinear Curve Fitting

۱ - مقدمه:

شمارنده‌های گایگر-مولر جزء پرکاربردترین آشکارسازها شناخته می‌شوند. مطالعات تجربی و نظری زیادی برای بررسی زمان مرده طولانی ($\rho \sim 100 \mu\text{s}$) شمارنده‌های گایگر مولر و حل مشکلات ناشی از این زمان مرده انجام شده است [۴-۱]. از آنجا که زمان مرده باعث از دست رفتن تصادفی شمارش‌ها می‌شود [۵]، توزیع شمارش‌های ثبت شده توسط شمارنده از حالت ایده آل پواسونی خارج می‌شود [۶]. در غیاب زمان مرده، شمارش‌ها از توزیع پواسون پیروی می‌کنند و انحراف استاندارد برابر با $\sqrt{N}$ (ریشه دوم تعداد شمارش‌ها) است. اما اگر زمان مرده وجود داشته باشد، توزیع شمارش‌ها غیر پواسونی می‌شود، که منجر به کاهش دقت شمارش و تغییر در نحوه محاسبه انحراف استاندارد می‌شود [۷]. بنابراین استفاده از این آشکارسازها به آهنگ‌های شمارش نسبتاً پایین محدود می‌شود و برای شرایطی که آهنگ شمارش بالا است باید تصحیح اثر زمان مرده روی نرخ شمارش‌ها انجام شود. روش‌های متداول پیشنهاد شده برای تعیین زمان مرده‌ی آشکارساز مثل روش دو چشمه^{۸۴}، اسیلوسکوپ، دو اسیلوسکوپ، پالس مضاعف و... زمانبر و پرهزینه می‌باشند. روش دیگری بر پایه واپاشی تک چشمه ^{56}Mn با نیمه عمر کوتاه (۲/۵۸ ساعت) برای تعیین زمان مرده آشکارساز گایگر-مولر وجود دارد [۱۱]. در صورتی که دسترسی به چشمه‌های کاملاً یکسان در روش دو چشمه و چشمه‌ی با نیمه عمر کوتاه در روش تک چشمه واپاشی^{۸۵} امکان پذیر نباشد، در این مقاله روشی بر مبنای استفاده از یک چشمه‌ی با نیمه عمر بالا (به عنوان مثال ^{89}Sr با نیمه عمر ۲۸/۹ سال) برای تعیین زمان مرده پیشنهاد شده است.

۲ - روش کار:

دو نوع زمان مرده اصلی وجود دارد: زمان مرده تمدید پذیر^{۸۶} و زمان مرده تمدید ناپذیر^{۸۷}. تمام شمارنده‌های هسته‌ای می‌توانند با یکی از این دو نوع یا ترکیبی از آن‌ها توصیف شوند. مدل تمدید ناپذیر به این صورت است که زمان مرده توسط پالس جدیدی که در طول دوره زمان مرده وارد می‌شود تمدید نمی‌شود.

^{۸۴} Two Source Method

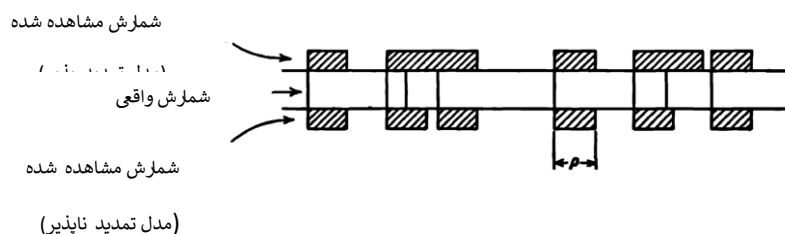
^{۸۵} Decaying source Method

^{۸۶} Extended Dead Time

^{۸۷} Non-Extended Dead Time



برای سیستم‌های به اصطلاح فلج شونده با زمان مرده از نوع تمدید پذیر هر رویداد ورودی زمان مرده‌ی سیستم را به اندازه ρ تمدید می‌کند [۸]. زمان مرده‌ی شمارنده گایگر-مولر از مدل تمدید ناپذیر تبعیت می‌کند [۹].



شکل (۱) تصویر شماتیک از رفتار سیستم‌های شمارش دارای زمان مرده ρ ، محور زمان از چپ به راست است.

در شکل (۱) شمارش واقعی در زمان‌هایی رخ می‌دهد که با خطوط عمودی در امتداد بخش مرکزی نشان داده شده است. سیستم تمدید پذیر فقط به فواصل زمانی بیشتر از ρ پاسخ می‌دهد و هر رویداد جدید زمان مرده‌ی جدیدی برای سیستم ایجاد می‌کند. تعداد شمارش‌های مشاهده شده و زمانی که سیستم تمدید پذیر در آن حساس نیست با بلوک‌های سایه‌دار نشان داده می‌شود. هر رویداد جدید سیستم تمدید ناپذیر را نمی‌تواند تمدید کند و فقط آن رویدادی که در بازه‌ی کمتر از ρ وارد سیستم می‌شود از دست می‌رود. در مثال فرضی نشان داده شده در این شکل هشت شمارش واقعی وجود دارد که تعداد شش عدد توسط سیستم تمدید ناپذیر و پنج عدد توسط سیستم تمدید پذیر ثبت شده اند.

در واقع در یک شمارنده پس از ثبت یک پالس، شمارنده به پالس‌های متوالی پاسخ نمی‌دهد تا زمانی که یک بازه زمانی مساوی یا بیشتر از زمان مرده‌ی آن سپری شود. توزیع فواصل زمانی نشان می‌دهد که احتمال وقوع فواصل کوتاه بیشتر از فواصل طولانی بین رویدادهای متوالی در یک توزیع تصادفی است. اگر فاصله‌ی بین دو رویداد واقعی کوتاه تر از زمان مرده (ρ) باشد، تنها رویداد اول ثبت می‌شود. به علت عدم ثبت شدن بعضی از تابش‌ها، علاوه بر کاهش تعداد شمارش‌ها، انحراف توزیع شمارش‌ها از توزیع پواسن به وجود می‌آید. در نتیجه، فواصل بسیار کوتاه رویدادها در خروجی آشکارساز از دست می‌روند. توزیع مشاهده شده دارای یک مقدار متوسط و یک انحراف استاندارد خواهد بود که با مقادیر واقعی برای فرایند تصادفی اولیه متفاوت است [۷]



در توزیع پواسون در حالتی که تعداد انجام آزمایشات به بی‌نهایت میل کند، مقدار واریانس و میانگین با هم برابر خواهد بود. این امر در عمل امکان‌پذیر نیست اما با تکرار تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌توان به نتایج دقیق‌تری رسید [۱۰]. بنابراین در یک توزیع پواسن واقعی نسبت واریانس به میانگین برابر یک است. به دلیل زمان مرده شمارنده گایگر-مولر، توزیع تعداد شمارش‌ها از توزیع پواسون دور خواهد شد. در این صورت نسبت واریانس به میانگین دیگر برابر با یک نخواهد بود. دو مدل برای محاسبه نسبت واریانس به میانگین برای سیستم‌های تمدید ناپذیر در این مقاله بررسی شده است که به شرح آن‌ها می‌پردازیم:

$$nT \cong \frac{NT}{1+N\rho} + \frac{N^2\rho^2}{2(1+N\rho)^2} \quad (1)$$

که در این رابطه N آهنگ میانگین واقعی، T زمان مشاهده شده یا زمان اندازه‌گیری شده، ρ زمان مرده سیستم، NT تعداد رویدادهای واقعی و nT تعداد رویدادهای مشاهده شده می‌باشد [۷]. ملاحظه می‌شود چنانچه $N\rho \ll 1$ باشد، رابطه (۱) به رابطه‌ی زیر تغییر می‌یابد:

$$N = \frac{n}{1-n\rho} \quad (2)$$

واریانس تعداد شمارش‌ها در فرس‌های [۷ و ۸] به صورت زیر محاسبه شده است:

$$(\sigma^2)^{\sigma} \cong \frac{NT}{(1+N\rho)^2}$$

مدل مولر^{۸۸}:

زمان مرده باعث می‌شود که واریانس نسبی فرایند شمارش کاهش یابد [۱۲]. در مدل زمان مرده تمدید ناپذیر زمان مرده برابر است با ρ . فرض می‌شود فرایند اصلی پواسونی با آهنگ شمارش ثابت ρ باشد.

میانگین آهنگ شمارش اندازه‌گیری شده با فرمول زیر بیان می‌شود:

$$(\xi n = \frac{N}{1+N\rho})$$

اصلاح آهنگ شمارش:

$$\lambda = (1 + N\rho)^{-1} \quad (5)$$

فرمول ساده شده‌ای برای واریانس $(\sigma^2(k, T))$ تعداد پالس‌ها در زمان T برای شرایطی که $T \gg \rho$ باشد به صورت زیر است:

^{۸۸} Jorg W. Muller

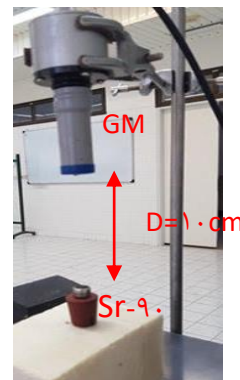


$$\sigma^2(k, T) = \lambda^2 \left[NT + x^2 \lambda \left(1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن متغیر $x = N\rho$ بدون بعد می‌باشد. واریانس و مقدار میانگین نرخ شمارش از طریق انجام آزمایش تجربی تعیین شدند.



ب



الف

نسبت به تیوب گایگر-مولر. شکل (۲-ب) شمارنده اسکالر و تایمر Sr^{90} شکل (۲-الف) موقعیت چشمه

برای انجام این کار از یک منبع واپاشی ^{90}Sr ۳۸۹۰ استفاده می‌کنیم. منبع در جلوی یک تیوب گایگر-مولر قرار می‌گیرد و اندازه‌گیری شمارش‌ها هر ده ثانیه ($T = 10\text{ s}$) انجام می‌شود. با تغییر فاصله‌ی چشمه از شمارنده در گام‌های ۱ cm آهنگ شمارش‌ها در هر فاصله اندازه‌گیری شدند. روند تغییر آهنگ شمارش‌ها از قانون عکس مجذور فاصله تبعیت می‌کند. هندسه‌ی کلی این آزمایش در شکل (۲) نمایش داده شده است. این هندسه شامل یک تیوب گایگر-مولر برای تشخیص پرتوها، یک شمارنده اسکالر، یک منبع واپاشی ^{90}Sr (با نیمه عمر ۲۹/۹ سال و اکتیویته ۵/۱ μCi) و یک پایه یونولیتی برای جلوگیری از تغییرات احتمالی در هندسه آزمایش می‌باشد.

منحنی‌ها و جدول‌ها با کیفیت خوب و ابعاد مناسب تهیه شود کلیه منحنی‌ها و جدول‌ها با کیفیت برای تعیین زمان مرده، از دو مدل ایوانز و مولر استفاده شد. داده‌های تجربی شامل مقادیر واریانس و میانگین نرخ شمارش، مطابق جدول (۱)، به عنوان ورودی در معادلات (۳) و (۶) قرار گرفتند. این داده‌ها با استفاده از روش برازش تابع غیرخطی (nonlinear curve fitting) پردازش شدند. برای این منظور از کتابخانه SciPy. Optimize و برنامه curve_fit در محیط پایتون استفاده شد. این برنامه با برازش داده‌ها مقادیر مقادیر بهینه‌ی زمان مرده تمديد ناپذیر را برای هر دو مدل استخراج نمود.

۳ - نتایج:

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در این جدول، مقادیر واریانس و میانگین نرخ شمارش برای فواصل مختلف از چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr ثبت شده است. از این داده‌ها برای استخراج مقدار زمان مرده استفاده شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ شمارش، مقدار واریانس نسبت به مقدار مورد انتظار از توزیع پواسون کاهش یافته است. این انحراف ناشی از اثر زمان مرده‌ی آشکارساز است که باعث از دست رفتن شمارش‌ها در نرخ‌های بالا می‌شود. در نتیجه، خطا در شمارش‌های بالا تا ۴ درصد افزایش یافته و داده‌های تجربی از مدل ایده‌آل فاصله گرفته‌اند. برای محاسبه‌ی مقدار زمان مرده، داده‌های تجربی در مدل‌های ایوانز و مولر برازش داده شدند. مقدار زمان مرده‌ی تمديد ناپذیر با استفاده از روابط (۳) و (۶) محاسبه شد و نتایج هر دو مدل مقدار یکسانی برابر با $\rho = 85.232 \mu\text{s}$ را نشان دادند.

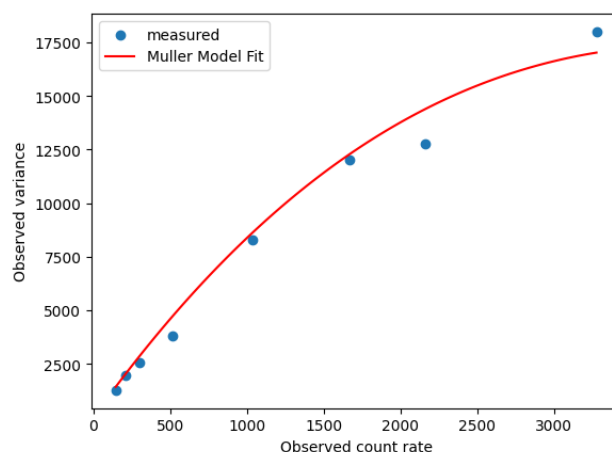
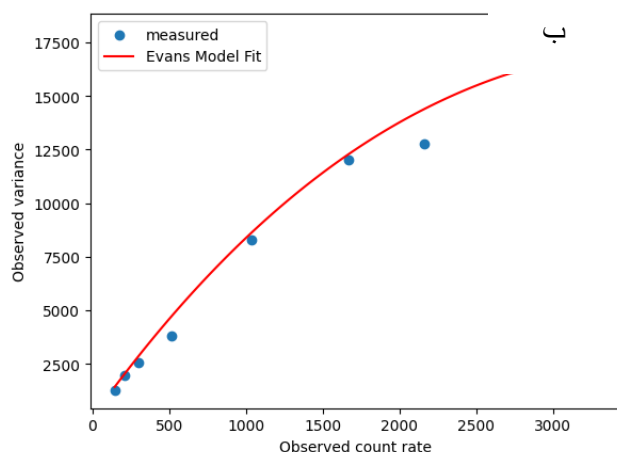
جدول (۱) مقادیر واریانس و میانگین حاصل از اندازه‌گیری.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	فاصله d-s cm
۱۷۹۹۹.۲	۱۲۷۴۷.۷	۱۲۰۰۵.۱	۸۲۹۳.۶	۳۸۰۵.۴	۲۵۶۳	۷۹۴۹.۳	۱۲۶۶.۶	واریانس
۳۲۷۷.۷	۲۱۶۵.۱	۱۶۷۱	۱۰۳۸.۱	۵۱۲.۶	۳۰۲.۷	۲۱۱.۶	۱۴۵.۸	متوسط نرخ شمارش

این مقدار با داده‌های حاصل از روش دو چشمه و همچنین مقادیر اعلام شده توسط سازنده‌ی آشکارساز مطابقت خوبی دارد.

شکل (۳-الف) برازش واریانس مشاهده شده با آهنگ شمارش مشاهده شده در مدل مولر

شکل (۳-ب) برازش واریانس مشاهده شده با آهنگ شمارش مشاهده شده در مدل ایوانز



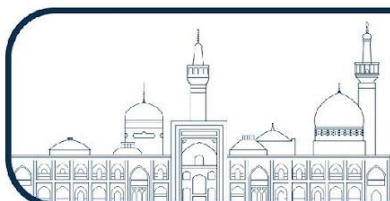
۴ - بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه با توجه به اینکه زمان مرده آشکارساز گایگر-مولر از مدل تمديد ناپذیر تبعیت می‌کند، زمان مرده تمديد ناپذیر یک سیستم آشکارسازی گایگر-مولر با استفاده از مقدار واریانس و میانگین حاصل از نتایج تجربی برای آهنگ‌های شمارش متفاوت و با به کارگیری روشی جدید و کارآمد که نیازی به دو چشمه یا چشمه‌ای با نیمه عمر کوتاه ندارد، اندازه‌گیری شد. این روش می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش متداول دو چشمه یا روش‌های مبتنی بر یک چشمه با نیمه عمر کوتاه و یا روش‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد. روش پیشنهادی دارای مزایایی متعددی می‌باشد. به عنوان مثال: الف) استفاده از یک چشمه‌ی منفرد که باعث سادگی اجرا و عدم نیاز به تنظیم دقیق چشمه‌های همسان (در روش دو چشمه)، ب) در مقایسه با روش چشمه‌ی با نیمه عمر کوتاه، این روش امکان اندازه‌گیری‌های پایدارتر و طولانی‌تر را فراهم می‌کند و نهایتاً ج) روش ارائه شده با استفاده از برازش غیرخطی داده‌های تجربی، دقت بیشتری در تعیین زمان مرده ارائه می‌دهد. همین‌طور می‌توان این روش را به آشکار سازهایی که از مدل تمديد پذیر تبعیت می‌کنند توسعه داد.



۵ - مراجع:

- [۱] Skinner, S.M., The efficiency of the tube counter. *Physical Review*, ۱۹۳۵. ۴۸(۵): p. ۴۳۸.
- [۲] Stever, H., The discharge mechanism of fast GM counters from the deadtime experiment. *Physical Review*, ۱۹۴۲. ۶۱(۱-۲): p. ۳۸.
- [۳] Danforth, W., Concerning the recovery time of Geiger-Mueller counters. *Journal of the Franklin Institute*, ۱۹۳۵. ۲۱۹(۱): p. ۱۰۸-۱۱۰.
- [۴] Neher, H. and W. Harper, A high speed Geiger-counter circuit. *Physical Review*, ۱۹۳۶. ۴۹(۱۲): p. ۹۴۰.
- [۵] Syam, N.S., et al., Statistical parameter study of the time interval distribution for nonparalyzable, paralyzable, and hybrid dead time models. *Journal of the Korean Physical Society*, ۲۰۱۸. ۷۲: p. ۱۱۳۳-۱۱۳۸.
- [۶] Lee, S.H., R.P. Gardner, and M. Jae, Determination of dead times in the recently introduced hybrid GM counter dead time model. *Journal of Nuclear Science and Technology*, ۲۰۰۴. ۴۱(sup۴): p. ۱۵۶-۱۵۹.
- [۷] Evans, R.D. and R. Evans, *The atomic nucleus*. Vol. ۵۸۲. ۱۹۵۵: McGraw-Hill New York.
- [۸] Arkani, M. and H. Khalafi, An improved formula for dead time correction of GM detectors. *Nukleonika*, ۲۰۱۳. ۵۸.
- [۹] Patil, A. and S. Usman, Measurement and application of paralysis factor for improved detector dead-time characterization. *Nuclear technology*, ۲۰۰۹. ۱۶۵(۲): p. ۲۴۹-۲۵۶.
- [۱۰] Jalilzadeh.H, Determining Detector Dead Time by Statistical Analysis of Detector Counts. ۲۰۲۴, University of Tabriz, Faculty of physics. p. ۱۱۵.
- [۱۱] Pommé, S., *Dead time, pile-up, and counting statistics*. ۲۰۰۷, ACS Publications.
- [۱۲] Müller, J.W., Dead-time problems. *Nuclear instruments and methods*, ۱۹۷۳. ۱۱۲(۱-۲): p. ۴۷-۵۷.



استفاده از روش افت هم دما در تعیین پارامترهای سینتیک دزیمتر ترمولومینسانس

$\text{LiF:Mg;Ti(TLD-100)}$ تحت پرتودهی گاما در دز ۳ گری (کد مقاله: ۱۳۱۴)

لاله پوراسد*^۱، مصطفی زاهدی‌فر^۱، ناهید حاجیلو^۲، احسان صادقی^۱، سمیه هارونی^۱

^۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، کاشان-ایران

^۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کرج، استان البرز، ایران، صندوق پستی: ۳۱۴۶۵/۱۴۹۸

چکیده:

یکی از مهمترین دزیمترهای ترمولومینسانس TLD-100 یا همان LiF:Mg;Ti است. در این پژوهش خواص دزیمتری ترمولومینسانس تراشه‌های TLD-100 در پرتودهی گاما بررسی شدند. پرتودهی گاما با استفاده از چشمه ^{60}Co انجام شد. منحنی‌های تابش ترمولومینسانس با استفاده از پرتودهی در دز ۳ Gy گاما رسم و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. منحنی درخشندگی این بلورها شامل چهار قله ی همپوش که از نظر دزیمتری از اهمیت زیادی برخوردارند در دماهای ۴۰۲، ۴۴۴، ۴۷۶ و ۴۹۹ کلوین به دست آمدند. تعداد قله‌ها در منحنی درخشندگی دزیمترهای ترمولومینسانس TLD-100 و پارامترهای سینتیک مربوط به هر قله با روش افت هم دما تعیین شدند و روند تغییرات پارامترهای گیراندازی نظیر مرتبه سینتیک، انرژی فعالسازی، فاکتور فرکانس و نیمه عمر چهار قله بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: دزیمتر ترمولومینسانس، پرتوی گاما، پارامترهای سینتیک، روش افت هم‌دما.

Using isothermal decay method in determining kinetic parameters of dosimeter Thermoluminescence of $\text{LiF:Mg;Ti(TLD-100)}$ under gamma irradiation in dose ۳ Gray

Laleh pourassad^۱, Zahedifar Mostafa^۱, Hajilo nahid^۲, Sadeghi Ehsan^۱, Harooni Somayeh^۱

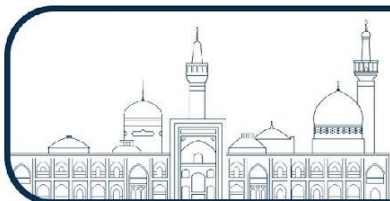
^۱. Department of physics, Faculty of Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.

^۲. Nuclear Sciences and Technology Research Institute, Radiation Application Research Institute, Karaj, Alborz Province, Iran, PO Box: ۱۴۹۸/۳۱۴۶۵

Abstract:

One of the most important thermoluminescent dosimeters is TLD-100 or LiF:Mg;Ti . In this study, the thermoluminescence dosimetry properties of TLD-100 chips were examined in gamma ray. The gamma beam was performed using the ^{60}Co source. Thermoluminescence glow curves were drawn using radiation in ۳ Gy gamma doses and the results were examined. The glow curve of these crystals consisting of four overlapping peaks of great importance in terms of Dosimetry were obtained at temperatures of ۴۰۲, ۴۴۴, ۴۷۶ and ۴۹۹ K. The number of peaks in the glow curve of the TLD-100 thermoluminescence dosimeters and the kinetic parameters related to each peak were determined by isothermal decay method, and the process of changes of trapping parameters such as kinetic order, activation energy, frequency factor and half-life of four peaks were investigated.

Keywords: Thermoluminescence dosimeter, Gamma ray, kinetic parameters, Isothermal decay method



۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و بررسی آهنگ دز وجود دارد که یکی از بهترین این روش‌ها هم از نظر میزان تعیین مقدار دز جذب شده پرتوهای یون‌ساز و هم از نظر میزان دقت و حساسیت، دزیمتری به روش ترمولومینسانس است. فرآیندهایی که منجر به گسیل ترمولومینسانس از یک نمونه می‌گردند عمدتاً مربوط به گذار حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) بین نواحی شبکه‌ای در مواد جامد نیمه‌هادی یا عایق مورد آزمایش هستند و می‌توان آن‌ها را به دو دسته مراکز گیراندازی و مراکز بازترکیب تقسیم کرد [۱]. از روش ترمولومینسانس برای عمرسنجی، کشف معادن اورانیوم، دزیمتری شخصی، دزیمتری محیطی و دزیمتری پزشکی استفاده می‌شود. پس از اینکه مواد ترمولومینسانس مورد پرتودهی قرار گرفتند، با حرارت دادن نمونه، حامل‌های بار به حالت برانگیخته گذار پیدا می‌کنند، یعنی الکترون‌ها از مراکز گیراندازی به باند هدایت و یا حفره‌ها از مراکز بازترکیب به باند ظرفیت رفته و هنگام بازگشت به حالت پایه، حامل‌های بار واقع در مراکز بازترکیب با حامل بار با علامت مخالف بازترکیب انجام می‌دهند و منجر به گسیل لومینسانس می‌شوند [۲].

یکی از مهم‌ترین دزیمترهای ترمولومینسانس TLD-100^{۸۹} (TLD) یا همان LiF:Mg;Ti است. این دزیمتر معادل بافت بدن است و بیش‌ترین کاربرد را در مراکز تحقیقاتی و پزشکی دارد. پارامترهای سینتیک، ماهیت سینتیک هر قله را مشخص می‌کند، درواقع خطی یا غیر خطی بودن پاسخ TL نسبت به مقدار دز دریافتی یا رفتار سینتیک مرتبه اول، دوم یا هر نوع دیگر سینتیک در موقع آشکارسازی ترمولومینسانس و یا بستگی مقدار دز دریافتی به آهنگ دریافت دز با مطالعه این پارامترها ارتباط دارند. از طرف دیگر دانستن این کمیت‌ها هنگام مطالعه پایداری قله‌های مختلف در درجه حرارت معین به ویژه در درجه حرارت‌های بالا حائز اهمیت خواهد بود [۳]. عمده‌ترین روش‌های تعیین پارامترهای سینتیک عبارتند از روش‌های متعدد دما، روش صعود اولیه، روش افت هم دما و روش انطباق منحنی. که در این پژوهش از روش افت هم دما جهت تعیین پارامترهای سینتیک دزیمتر ترمولومینسانس TLD-100 در پرتودهی گاما استفاده شد.

۲- روش کار

قرص‌های TLD-100 به صورت لایه‌های نازک با ابعاد $۰.۸۹۹ \times ۳.۱۷۵ \times ۳.۱۷۵$ میلی متر مکعب ساخت کمپانی هارشا تهیه شدند و مورد پرتودهی قرار گرفتند و تعدادی از آن‌هایی که پاسخ‌های مشابه داشتند انتخاب شدند. پس از آن به روی این نمونه‌ها عملیات بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت و ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت دو ساعت انجام شد. پرتودهی گاما نمونه‌ها با چشمه ^{60}Co انجام شد. پس از پرتودهی نمونه‌ها با دستگاه TLD-reader مدل ۴۵۰۰ Harshow در بازه دمایی ۵۰-۲۵۰ °C با تندی دمای ۲ °C/S قرائت شده و منحنی‌های درخشش مربوطه ثبت گردید. روش افت هم دما که اولین بار توسط راندال و ویلکینز^{۹۰} [۴] ارائه شد. هم چنین راسز^{۹۱} [۵] با این فرض که سرعت تونل‌زنی وابسته به دما است، سازوکار بازترکیب الکترون و حفره را توصیف کرده است. این روش شامل گرم کردن سریع ماده ترمولومینسانس تا

^{۸۹} thermoluminescence dosimeters

^{۹۰} Randall and Wilkins

^{۹۱} Rácz



یک دمای ثابت مربوط به قله مشخص و نگاه داشتن آن به مدت معین و ثبت منحنی افت هم‌دما است. بنابراین می‌توان آهنگ واپاشی الکترون به دام افتاده را ارزیابی کرد. شدت ترمولومینسانس مطابق با رابطه‌ی (۱) داده می‌شود:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{S}{N^{b-1}} n^b \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (1)$$

که در آن S فاکتور فرکانس می‌باشد و دارای ابعاد sec^{-1} است، n تعداد الکترونی که در مرکز گیراندازی به دام افتاده است، b مرتبه‌ی سینتیک، E انرژی فعال‌سازی، K ثابت بولتزمن و T دما بر حسب کلوین است. برای محاسبه‌ی پارامترهای سینتیک ابتدا پارامتر (b) باید تعیین شود. پارامتر (b) مشخص کننده‌ی نوع رفتار قله در منحنی درخشش است و بدون تعیین این پارامتر، محاسبه‌ی پارامترهای دیگر امکان‌پذیر نخواهد بود. از بین روش‌های موجود برای تعیین این پارامتر، روش استفاده از منحنی افت هم‌دما به کار گرفته شد. چنان‌چه رابطه‌ی (۱) را برای یک دمای ثابت در نظر بگیریم، با انتگرال‌گیری و حل معادله‌ی (۱) نتیجه زیر برای شدت افت هم‌دما مطابق با معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$I^{(1/b)-1} = a + bt \quad (2)$$

که در آن a و b ثابت و t زمان واپاشی می‌باشد. اگر از طرفین نسبت به زمان مشتق گرفته شود و در نهایت تغییرات منحنی روی محورهای مختصات لگاریتمی برحسب (I) رسم شود خط راستی با شیب $(1/b)-1$ را می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان مرتبه‌ی سینتیک (b) را به‌دست آورد.

با استفاده از منحنی‌های افت هم‌دما، انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس که از پارامترهای مهم درپدیده ترمولومینسانس هستند به‌دست می‌آید. با رسم تغییرات $\left(-\frac{I_0}{I}\right)^{(b-1/b)}$ نسبت به t خط راستی با شیب m به‌دست می‌آید:

$$m = s(b-1) \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (3)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳) به ازای دو دمای مختلف T_1 و T_2 دو معادله و دو مجهول در شیب‌های m_1 و m_2 به‌دست آمد و با حل این دو معادله رابطه مربوط به S به‌دست می‌آید:

$$s = \frac{1}{b-1} \left(\frac{m_2 T_2}{m_1 T_1} \right)^{\frac{1}{T_2-T_1}} \quad (4)$$

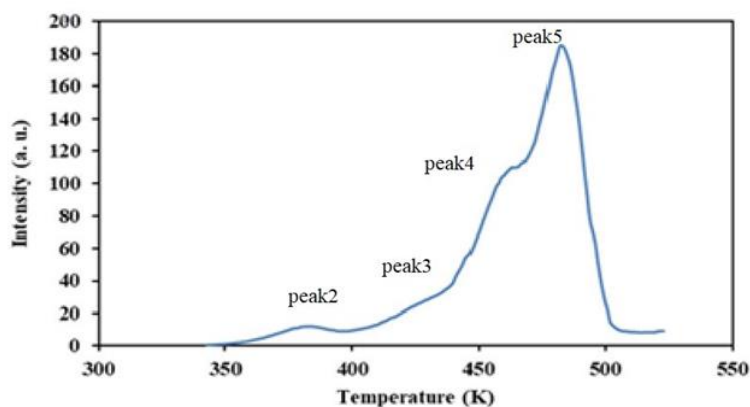
با به‌دست آمدن s و جای‌گذاری در رابطه‌ی بالا، مجهول دوم یعنی E برای چهار قله دز ۳ گری به‌دست می‌آید.



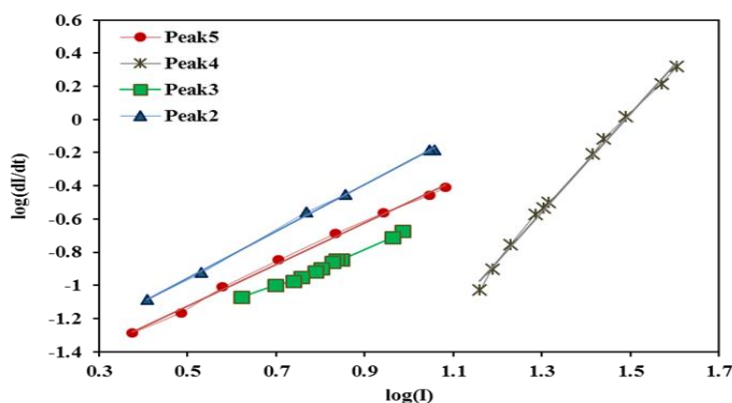
۳- نتایج

به منظور بررسی منحنی درخشش ترمولومینسانس و یافتن پارامترهای سینتیک دزیمتر TLD-100 ابتدا نمونه‌ها با مقدار دز ۳ گری پرتو دهی شدند و سپس شدت فوتون‌های گسیل شده برحسب دما به صورت منحنی درخشندگی ترمولومینسانس ثبت و در شکل ۱ رسم شد.

با رسم تغییرات منحنی $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ روی محورهای مختصات لگاریتمی برحسب (I) خط راستی با شیب $(1/b) - 2$ بدست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان مرتبه‌ی سینتیک (b) را به دست آورد. این نمودار برای TLD-100 در شکل ۲ رسم و مرتبه‌ی سینتیک (b) برای چهار قله به ترتیب ۱.۰۰۱، ۱.۰۰۱، ۱.۰۶۹ و ۱.۲۵ به دست آمد.



شکل ۱. منحنی درخشندگی TLD-۱۰۰ پس از پرتو دهی با پرتو گاما با دز ۳ گری

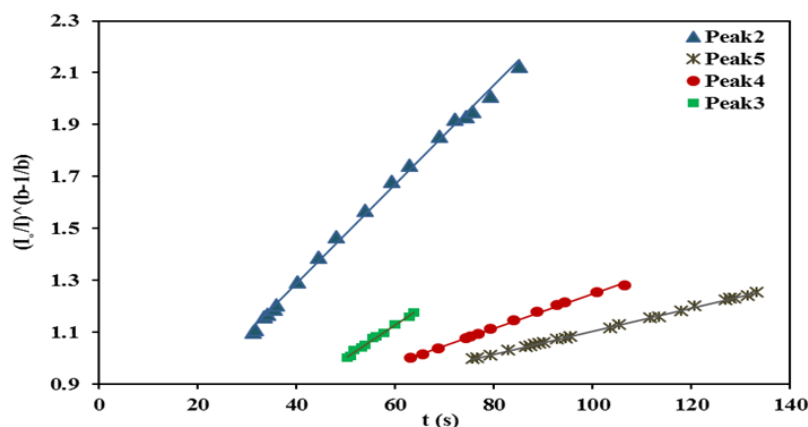


شکل ۲. نمودار $\log \frac{dI}{dt}$ بر حسب $\log I$ برای قله‌های مختلف در پرتو دهی با استفاده از چشمه ی گاما در دز ۳ گری

همانگونه که گفته شد، با استفاده از منحنی‌های افت دما، انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس به دست می‌آید. در شکل ۳

نمودار $\left(\frac{I_0}{I}\right)^{\left(b-\frac{1}{b}\right)}$ بر حسب t برای قله‌های مختلف پرتو دهی با استفاده از چشمه ی گاما در دز ۳ گری مقادیر به دست آمده

است. در جدول ۱ پارامترهای سینتیک مربوط به هر قله که با استفاده از نمودار شکل ۳ و روابط ۱ تا ۴ بدست آمده اند، ارائه شده است. مقادیر به دست آمده در جدول ۱ نشان داده شده است.

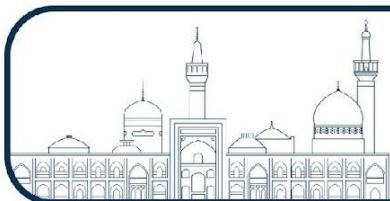


شکل ۳: نمودار $\left(\frac{I_0}{I}\right)^{(b-\frac{1}{b})}$ بر حسب t برای قله‌های مختلف پرتودهی با استفاده از چشمه ی گاما در دز ۳ گری

جدول ۱. پارامترهای به دست آمده با استفاده از روش افت هم دما

مرتبۀ سینتیک b))	فاکتور فرکانس S^{-1}	$t_{1/2}$	انرژی فعال سازی (eV)	$T_m(k)$	قله
۰۰۱/۱	۶.۶۵×۱۰^{۱۴}	۱۰d	۲۴۵۱/۱	۹۹/۴۰۲	۲
۰۰۱/۱	$۲۳ \times ۱۰^{۱۳}/۴$	۳۰۶/۱ y	۲۷۳۸/۱	۲۶/۴۴۴	۳
۰۶۹/۱	$۹۶ \times ۱۰^{۲۰}/۵$	$۴ \times ۱۰^۵ y$	۰۲۶۹/۲	۰۶/۴۷۶	۴
۲۵۷/۱	$۷۸ \times ۱۰^{۲۴}/۳$	$۶ \times ۱۰^۹ y$	۵/۲	۶۹/۴۹۹	۵

در مطالعه ی قله های دزیمتر ترمولومینسانس با کاربرد استفاده از داده های منحنی افت هم دما در تعیین مرتبه سینتیک، رفتار قله های دوم و سوم و چهارم نزدیک به مرتبه اول مشاهده شد و برای قله ی پنجم مقدار به دست آمده بزرگتر از واحد به دست آمد. زیرا در هنگام تخلیه ی هر قله تعدادی از الکترونهای تحریک شده در ترازهایی با عمق بیشتر جذب می شوند و برای آزاد کردن آنها به دمای بالاتری نیاز است. پس نتایج به دست آمده منطقی است که در قله ای که دمای بالاتری دارد (قله پنجم) مرتبه سینتیک افزایش یافته و پارامترهای گیر اندازی آن از معادلات سینتیک مرتبه عام پیروی کند. در حالی که در قله های دوم و سوم و چهارم امکان تبعیت از معادلات سینتیک مرتبه اول وجود دارد زیرا در این حال تقریباً تراز عمیقی برای جذب حامل های بار آزاد شده وجود ندارد و حامل های بار می توانند تماماً جذب مرکز باز ترکیب شوند و اعمال تقریب مرتبه اول برای این قله ها ممکن است. این مساله بیانگر این است که قله هایی که در دماهای بالاتری تخلیه ی می شوند باید از نظر انرژی، عمیق تر از قله های دیگر باشند. علاوه بر این، مقادیر فاکتور فرکانس تعیین شده برای چهار قله این دزیمتر از حدود $۱۰^{۱۴}$ برای قله دوم به حدود $۱۰^{۲۴}$ برای قله چهارم افزایش پیدا کرد که این افزایش می تواند مربوط به کاهش پایداری یا کاهش نیمه عمر آنها باشد، زیرا نیمه عمر قله های ترمولومینسانس با عکس فاکتور فرکانس آنها متناسب است.



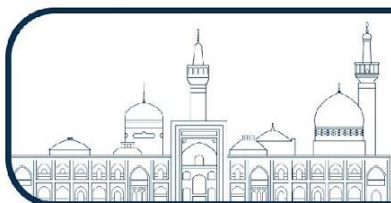
۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که در روش افت هم دما نیمه عمر قله ها به ترتیب از قله دوم تا قله پنجم افزایش پیدا کرده است. بنابراین می توان گفت پایداری قله های ترمولومینسانس فقط بستگی به فاکتور فرکانس آن ندارد و انرژی فعالسازی نیز در آن نقش دارد که به دلیل افزایش انرژی گیراندازی به ترتیب از قله دوم تا قله پنجم باعث جبران افزایش فاکتور فرکانس قله ها شده است، یعنی زمانی که فاکتور فرکانس قله ها افزایش پیدا می کند، افزایش عمق گیرانداز باعث جبران آن شده و نیمه عمر قله ها را افزایش می دهد. همچنین نتایج به دست آمده با توجه به مطالعات انجام شده توسط مصطفی زاهدی^{۹۲} که در پژوهشی نشان داد مقادیر متفاوتی برای پارامترهای قله های ۲-۵ وجود دارد، در توافق با یکدیگر بودند [۶].

۵- مراجع

۱. M.Sohrabi , M.Jafarzadeh , M.Zahedifar (۱۹۹۸), Analysis of kinetics and trapping parameters of LiF:Mg,Ti thermoluminescent dosimeters by general order model.
۲. Alizadeh, M., Mohseni, M., Farhood, B., Aliasgharzadeh, A., Moradi, H., & Ramazan i Moghaddam-Arani, A. (۲۰۲۲). Thermoluminescent Characteristics of GR-۲۰۰, TLD-۷۰۰H and TLD-۱۰۰ for Low Dose Measurement: Linearity, Repeatability, Dose Rate and Photon Energy Dependence
۳. Nelson, V. K., Holloway, L., & McLean, I. D. (۲۰۱۵). The application of thermoluminescence dosimetry in X-ray energy discrimination. Australasian physical & engineering sciences in medicine, ۳۸(۴), ۵۴۳-۵۴۹
۴. Randall, John Turton, and Maurice Hugh Frederick Wilkins. "Phosphorescence and electron traps-I. The study of trap distributions." Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences ۱۸۴,۹۹۹ (۱۹۴۵): ۳۶۵-۳۸۹.
۵. Rácz, Z., J. Lumin. ۲۳, ۲۵۵-۲۶۰ (۱۹۸۱).
۶. Zahedifar; Mostafa. Sadeghi; Ehsan. Sadeghi; Bahareh. Harooni; Somayeh Department of physics , University of kashan ,kashan. Determination of thermoluminescence kinetic parameter of TLD-۱۰۰ (LiF:Mg;Ti) for absorbed doses of ۱ and ۵Gy using variable heating rate, isothermal decay and initial rise methods. (In Persian)
۷. C.E. May, J.A. Partridge, Thermoluminescent kinetics of alpha irradiated alkali halides, J. Chem. Phys. ۴۰ (۱۹۶۴) ۱۴۰۱.
۸. Townsend P. D., Clark C. D. and Levy P. W. (۱۹۶۷) Thermoluminescence in lithium fluoride. Phl.,c. Rw.۱۵۵, ۹۰۸-۹۱۷

^{۹۲}Mostafa Zahedifar



یک مدل محاسباتی برای تعیین چگالی مواد در توموگرافی پراکندگی میون (کد مقاله :

(۱۳۳۶)

زهرا ایمانی، نجمه محمدی*، یوسف پزشکیان*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
آذربایجان شرقی، تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

توموگرافی پراکندگی میون روشی برای شناسایی مواد با چگالی‌های مختلف است که اساس آن انحراف میون‌ها در عبور از مواد می‌باشد. هدف این مقاله، ارائه رابطه‌ای میان چگالی مواد و میانگین زاویه پراکندگی میون‌ها است تا امکان شناسایی دقیق مواد بدون نیاز به شبیه‌سازی فراهم شود. برای این منظور با استفاده از کد مونت کارلو Geant4، 10^5 میون با انرژی ۴ GeV به صورت سطحی گسیل و عبور آن‌ها از ۱۴ عنصر مختلف ترابرد شد. پنج مدل ریاضی شامل چندجمله‌ای درجه سوم، درجه دوم، خطی، نمایی و توانی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده، برازش شد. نتایج نشان داد مدل چندجمله‌ای درجه سوم با ضریب تعیین 0.9814 ، دارای بیشترین تطابق با داده‌های شبیه‌سازی بوده و میانگین خطای مطلق 1.17 g/cm^3 و میانگین خطای نسبی 10.71% را دارد.

کلمات کلیدی: توموگرافی پراکندگی میون، شبیه‌سازی مونت کارلو، Geant4، مدل‌های برازش، ضریب تعیین.

A computational model for determining material density in muon scattering tomography

Zahra Imani, Najmeh Mohammadi* and Yousef Pezeshkian*

Physics department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Abstract

Muon scattering tomography is a technique for materials identification with various density based on the deflection of muons as they pass through substances. The objective of this paper is to establish a relationship between material density and the muon mean scattering angle, enabling precise material identification, without the need for simulations. To achieve this goal, the Geant⁴ Monte Carlo code was used to simulation. The surface source of muons with the energy of ۴ GeV were simulated and then, were transported through ۱۴ different materials. Five mathematical models—including third-degree polynomial, second-degree polynomial, linear, exponential, and power-law—were fitted to the output data. The results indicated that the third- degree polynomial model, with a coefficient of determination of 0.9814 , exhibited the highest compatibility with the simulated data, achieving an absolute error of 1.17 g/cm^3 and a relative error of 10.71% .

Key words: Muon scattering tomography, Monte Carlo simulation, Geant⁴, fitting models, coefficient of determination.



۱- مقدمه

شناسایی دقیق پسماندهای هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با افزایش تولید انرژی هسته‌ای و نیاز به مدیریت بهینه و ایمن این پسماندها، توسعه روش‌های نوین برای شناسایی و تحلیل آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، تکنیک‌های نوین تصویربرداری نقش کلیدی ایفا می‌کنند و توموگرافی پراکندگی میون^{۹۳} (MST) به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته در این حوزه مطرح شده است [۱]. میون‌ها، ذرات بنیادی مشابه الکترون‌ها ولی سنگین‌تر، دارای انرژی بالا و قدرت نفوذ فوق‌العاده‌ای هستند و به‌طور طبیعی از پرتوهای کیهانی تولید می‌شوند [۲]. نیمه‌عمر میون‌ها در حالت سکون در حدود $2 \mu s$ است [۳]. با این حال، به دلیل انرژی بالای این ذرات و حرکت آن‌ها با سرعتی نزدیک به سرعت نور، اثرات نسبیت خاص باعث افزایش نیمه‌عمر مؤثر میون‌ها در حال حرکت نسبت به حالت سکون می‌شود [۴]. این پدیده نسبیتی به میون‌ها اجازه می‌دهد مسافت‌های طولانی‌تری را قبل از واپاشی طی کنند. به عنوان مثال میون‌های دارای انرژی $2/4 \text{ GeV}$ دارای طول واپاشی 15 km هستند [۲]. اساس روش MST، انحراف زاویه‌ای میون نسبت به راستای فرودی به هنگام عبور از مواد است [۵]. هدف اصلی این مقاله، بررسی و مدل‌سازی رابطه بین چگالی مواد و زاویه پراکندگی میون‌ها در فرایند توموگرافی پراکندگی میون‌ها می‌باشد تا بتوان برای شناسایی پسماندهای هسته‌ای بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده، از این مدل‌ها استفاده کرد. در این مطالعه، عناصر مرتبط با پسماندهای هسته‌ای به دقت انتخاب شده‌اند تا نماینده‌ای از تنوع چگالی‌ها و ویژگی‌های شیمیایی این زباله‌ها باشند.

۲- مواد و روش‌ها

برهم‌کنش کولنی میون‌ها به عنوان ذرات باردار با الکترون‌ها و هسته‌های ماده، موجب پراکندگی چندگانه مسیر آن‌ها می‌شود که به نوع، ضخامت ماده و تکانه میون بستگی دارد. با استفاده از نظریه مولیر^{۹۴} (رابطه ۱)، می‌توان مقدار انحراف معیار زاویه پراکندگی میون‌ها را محاسبه کرد که این توزیع به صورت گاوسی با میانگین صفر نمایش داده می‌شود [۶].

$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta pc} \sqrt{\frac{T}{X} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{T}{X} \right) \right]}, \quad X. \quad (1)$$

$$\approx \frac{716.4 A \text{ g/cm}^2}{\rho \cdot Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

در این رابطه p تکانه ذره باردار، L ضخامت ماده و X_0 طول تابش ماده است و در رابطه X_0 ، A عدد جرمی، Z عدد اتمی و ρ چگالی ماده است.

۲-۱ شبیه‌سازی Geant4

در این مطالعه، کد مونت کارلوی Geant4، برای بررسی و شبیه‌سازی زاویه پراکندگی میون‌ها هنگام عبور از مواد مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی (شکل ۱)، حجم جهانی حاوی هوا، بصورت یک مکعب مستطیل با ابعاد cm^3

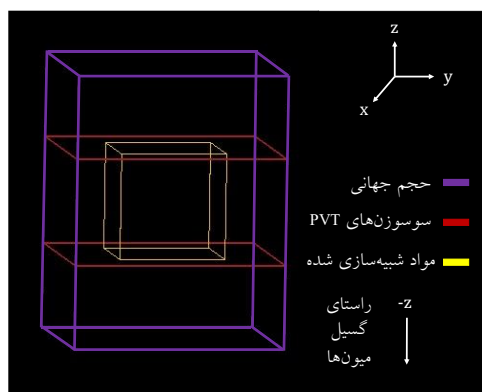
^{۹۳} Muon Scattering Tomography

^{۹۴} Molière's theory



۱۰۰×۱۰۰×۱۳۰ می‌باشد. در مرکز این حجم، مکعب حاوی مواد مختلف با ابعاد $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ قرار داده شده است. ابعاد مخازن ذخیره پسماندهای هسته‌ای بسته به نوع پسماند و کاربرد آن می‌تواند متفاوت باشد، این ابعاد کوچک‌تر، به دلیل بهینه‌سازی فرآیند شبیه‌سازی و کاهش بار محاسباتی در نظر گرفته شده‌اند. همه‌ی عناصر شبیه‌سازی شده، مطابق با پایگاه داده مواد GEANT^۴/NIST تعریف شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است. برای ثبت ورود و خروج میون‌ها از مکعب حاوی مواد، از سوسوزن‌های پلاستیکی پلی‌وینیل تولوئن^{۹۵} (PVT) با ضخامت 0.2 cm در بالا و پایین این مکعب استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از چشمه سطحی میون واقع در صفحه xy با ارتفاع $Z = 65 \text{ cm}$ که توسط GPS^{۹۶} تولید می‌شود، استفاده شده است. میانگین طیف انرژی میون‌ها در سطح دریا، حدود 4 GeV می‌باشد [۷]. برای بررسی زاویه پراکندگی میون‌ها در مواد، 10^5 میون با انرژی 4 GeV گسیلی از چشمه سطحی شبیه‌سازی شده است. ترابرد ذرات میون با استفاده از کلاس G^۴Step انجام شده است. در این کلاس، بردار تکانه ($\vec{p}$) میون‌های رسیده به سوسوزن پایین بدست آمده و زاویه پراکندگی میون نسبت به راستای مثبت محور Z از رابطه ۳ حاصل شده است. زاویه بدست آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از کد پایتون تحلیل شده و در نهایت زاویه انحراف میون نسبت به راستای گسیل آن، محاسبه شده است. لازم به ذکر است، خطای نسبی خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی، در همه موارد کمتر از 2% می‌باشد.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{p_z}{|\vec{p}|}\right) \quad (3)$$



شکل ۱: طرح‌واره هندسه شبیه‌سازی شده در Geant^۴.

جدول ۲: مشخصات عناصر در پایگاه داده مواد GEANT^۴/NIST.

Os	Pu	U	Ta	Hg	Tl	Ag	Cd	Fe	Cr	Zr	Ti	Sr	Cs	عنصر
۱۵۷	۱۸۴	۱۹۵	۱۶۵	۱۵۵	۱۷۲	۱۵۰	۱۵۶	۱۸۷	۱۱۸	۱۵۱	۱۵۴	۱۵۴	۸۷۳	چگالی (g/c)
۲۲	۱۹	۱۸	۱۶	۱۳	۱۱	۱۰	۸	۷	۷	۶	۴	۲	۱/	(m ³)
۷۶	۹۴	۹۲	۷۳	۸۰	۸۱	۴۷	۴۸	۲۶	۲۴	۴۰	۲۲	۳۸	۵۵	عدد اتمی

^{۹۵} Polyvinyl toluene

^{۹۶} General Particle Source



میون‌های محیطی دارای طیف انرژی گسترده‌ای هستند. میون‌های کم‌انرژی‌تر در این طیف، به دلیل برهم‌کنش بیشتر با ماده، اطلاعات سریع‌تری فراهم می‌کنند، اما نمی‌توانند به اعماق زیاد نفوذ کنند. در مقابل، میون‌های پرانرژی‌تر برای تصویربرداری زمان بیشتری نیاز دارند و در عمق‌های کم ممکن است بدون برهم‌کنش کافی عبور کنند. بنابراین، استفاده از طیف انرژی واقعی و در نظر گرفتن عمق هدف، کارایی تصویربرداری را بهبود می‌بخشد. در این مقاله از میون‌های تک‌انرژی 4 GeV که نزدیک به میانگین طیف انرژی میون‌های محیطی است، برای شبیه‌سازی استفاده شده است. میون‌ها با انرژی 4 GeV دارای نیمه‌عمر μs $83/2$ بوده و می‌توانند مسافتی در حدود 25 km را قبل از واپاشی طی کنند [۴]. در شبیه‌سازی انجام شده، میون‌ها تنها از یک حجم کوچک ($50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$) عبور می‌کنند که زمان عبور آن‌ها در حد نانوثانیه است. این زمان بسیار کوتاه‌تر از نیمه‌عمر مؤثر میون‌ها است، بنابراین واپاشی میون‌ها در طول شبیه‌سازی قابل چشم‌پوشی است. این موضوع نشان می‌دهد که تحقیق انجام شده از نظر زمانی کاملاً امکان‌پذیر است.

در شرایط واقعی، پسماندهای هسته‌ای معمولاً در زیر زمین دفن شده و لایه‌هایی با چگالی مشخص در بالای آن‌ها قرار می‌گیرند. این لایه‌ها باعث توقف میون‌های کم‌انرژی (در بخش پایین‌تر طیف انرژی) به دلیل تلفات انرژی و پراکندگی می‌شوند، در حالی که تنها میون‌های با انرژی‌های بالاتر قادر به عبور از این لایه‌ها و رسیدن به ماده هدف هستند. در نتیجه، بازه انرژی میون‌های مؤثر در تصویربرداری به سمت انرژی‌های بالاتر شیفت پیدا می‌کند. در این مطالعه، تنها ماده هدف بدون در نظر گرفتن اثرات لایه‌های بالایی مانند خاک یا سنگ بررسی شده است اما برای ترابرد و محاسبات دقیق‌تر، اثر پراکندگی از لایه‌های مختلف نیز باید در نظر گرفته شود که در مطالعات بعدی بررسی خواهد شد.

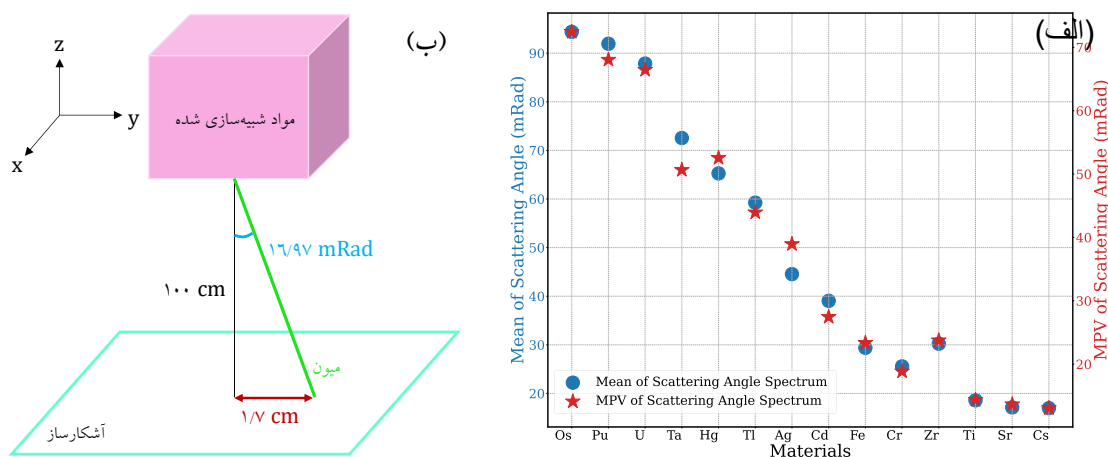
۳- نتایج

جهت بررسی تاثیر چگالی ماده بر زاویه پراکندگی میون، طیف زاویه پراکندگی میون‌های خارج شده از مواد شبیه‌سازی شده برای میون فرودی با انرژی 4 GeV بدست آمد. در شکل ۲ (الف)، میانگین طیف زاویه پراکندگی به همراه زاویه‌ای که میون‌ها با بیشترین احتمال از ماده خارج شده‌اند^{۹۷} (MPV)، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، میانگین زاویه پراکندگی میون‌ها و MPV رفتار مشابهی باهم داشته و با کاهش چگالی ماده، کاهش پیدا کرده‌اند. به طوری که میانگین زاویه پراکندگی برای مواد اوسمیوم، پلوتونیوم، اورانیوم، تانتالیوم، جیوه، تالیم، نقره، کادمیوم، آهن، کروم، زیرکونیوم، تیتانیوم، استرانسیم و سزیم به ترتیب دارای مقادیر $94/39$ ، $91/94$ ، $87/86$ ، $72/54$ ، $65/27$ ، $59/25$ ، $44/56$ ، $39/05$ ، $29/39$ ، $25/56$ ، $30/23$ ، $18/58$ ، $17/13$ و $16/97 \text{ mRad}$ می‌باشد. بر اساس این نتایج، بزرگترین میانگین زاویه پراکندگی $94/39 \text{ mRad}$ متعلق به اوسمیوم است که دارای بالاترین چگالی می‌باشد. در مقابل، سزیم با کمترین چگالی، پایین‌ترین میانگین زاویه پراکندگی $16/97 \text{ mRad}$ را دارد. تراکم بالای اتم‌ها در مواد چگال‌تر منجر به برهم‌کنش بیشتر میون‌ها و افزایش زاویه پراکندگی می‌شود. بنابراین، زاویه پراکندگی میون‌ها می‌تواند برای شناسایی و تمایز مواد مختلف بر اساس چگالی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۸]. با توجه به شکل ۲ (ب)، برای اندازه‌گیری کوچک‌ترین میانگین زاویه پراکندگی یعنی $16/97 \text{ mRad}$ ، اگر فاصله آشکارساز از هدف 100 cm باشد،

^{۹۷} Most Probable Value



دقت آشکارساز باید کمتر از $1/7$ cm باشد تا این زاویه به درستی ثبت شود. این شکل نشان می‌دهد که انتخاب دقت مناسب آشکارساز و فاصله آن از هدف، برای ثبت دقیق زوایای پراکندگی در آزمایش‌های عملی بسیار مهم است.



شکل ۲: (الف)، MPV و میانگین زاویه پراکندگی میون با انرژی فرودی 4 GeV برای مواد مختلف و (ب)، تاثیر فاصله آشکارساز از هدف بر دقت اندازه‌گیری زاویه پراکندگی

به دلیل وابستگی زاویه پراکندگی میون‌ها به چگالی مواد، در این مطالعه سعی شده است یک رابطه دقیق بین این دو پارامتر برقرار شود. هدف اصلی تحقیق، امکان تعیین نوع ماده از طریق اندازه‌گیری زاویه پراکندگی میون بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. برای این منظور، مدل‌های ریاضی متعددی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده برازش شدند. از میان تمام مدل‌های آزمایش شده، مدل‌های چندجمله‌ای درجه سوم، درجه دوم، خطی، توانی و نمایی به دلیل ارائه نتایج بهتر و تطابق بیشتر با داده‌ها انتخاب و گزارش شدند. پیش از برازش، داده‌های میانگین زاویه پراکندگی به صورت خطی مقیاس‌بندی شده و بر ۱۰۰ تقسیم شدند تا بهنجارش شده و تاثیر مقادیر بسیار بالا یا پایین کاهش یابد. این مقیاس‌بندی باعث بهبود دقت مدل‌ها و امکان مقایسه بهتر بین مدل‌های مختلف شد. در تحلیل مدل‌های برازش شده، از معیارهای ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل شده ($Adjusted R^2$) برای ارزیابی تطابق مدل با داده‌های شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین ناحیه اطمینان^{۹۸} (CI) و ناحیه پیش‌بینی^{۹۹} (PI) تعیین شده‌اند که به ترتیب بازه چگالی ماده و میزان اختلاف پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی را نشان می‌دهند. خطای مطلق نیز به عنوان نصف ناحیه پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. این پارامترها امکان مقایسه مدل‌های مختلف برازش شده را فراهم کرده و به انتخاب بهترین مدل بر اساس دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری کمک می‌کنند. نتایج مقایسه مدل‌ها در جدول ۲ و نمودارهای برازش مدل‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.

^{۹۸} Confidence Interval

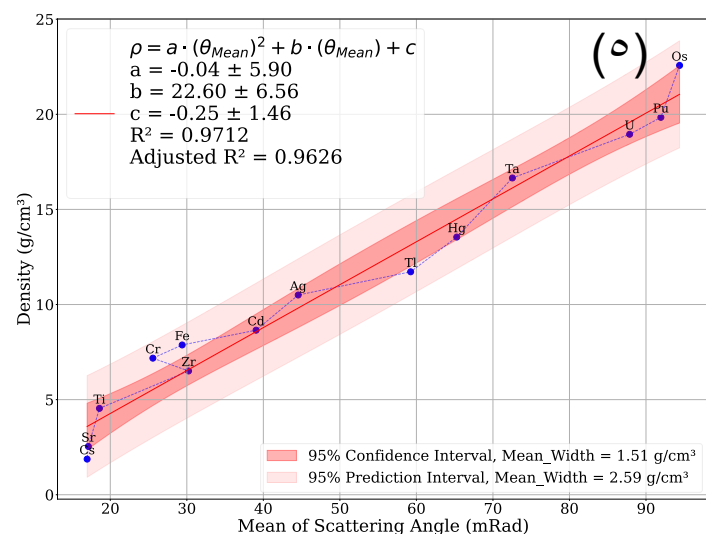
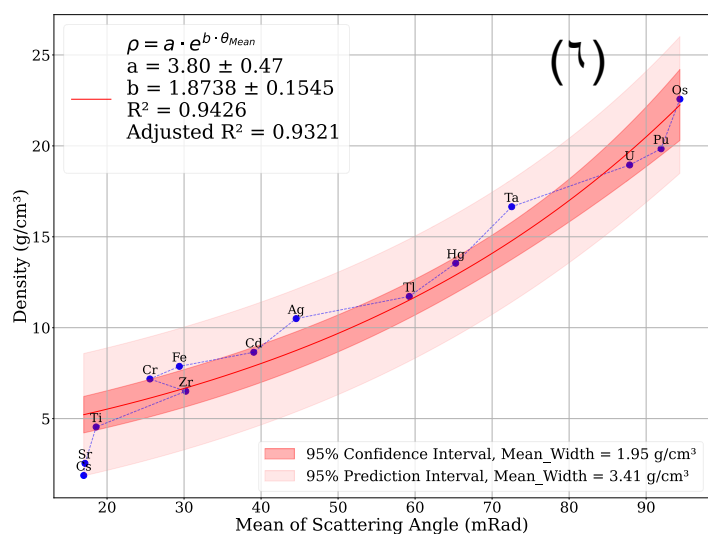
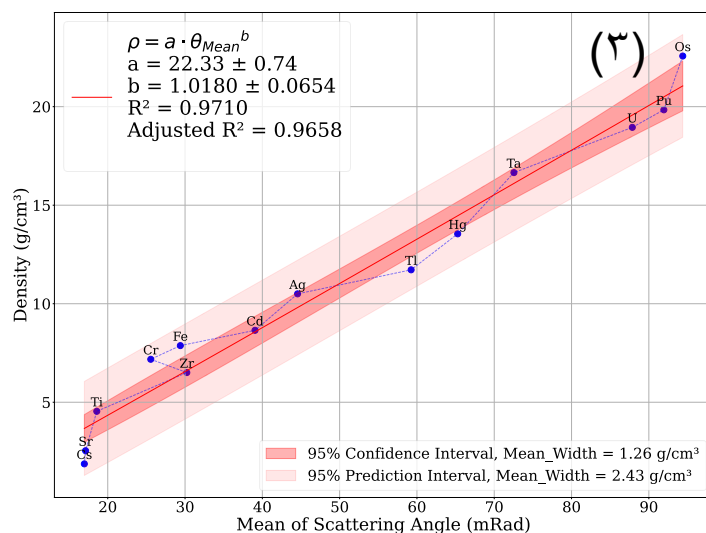
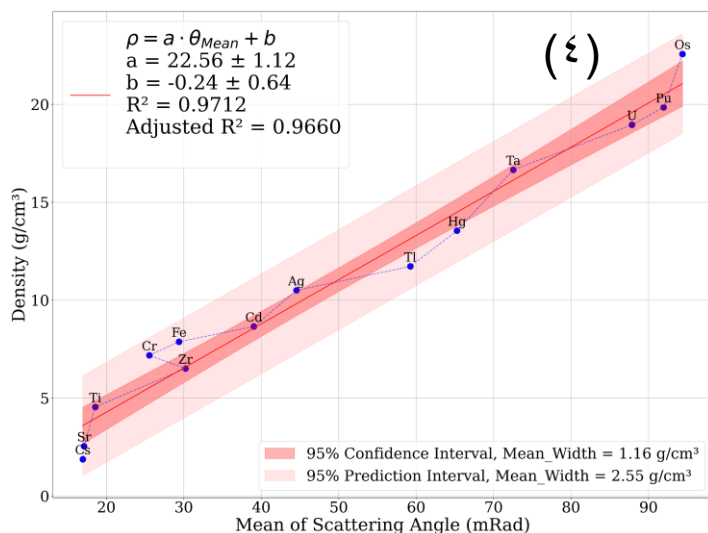
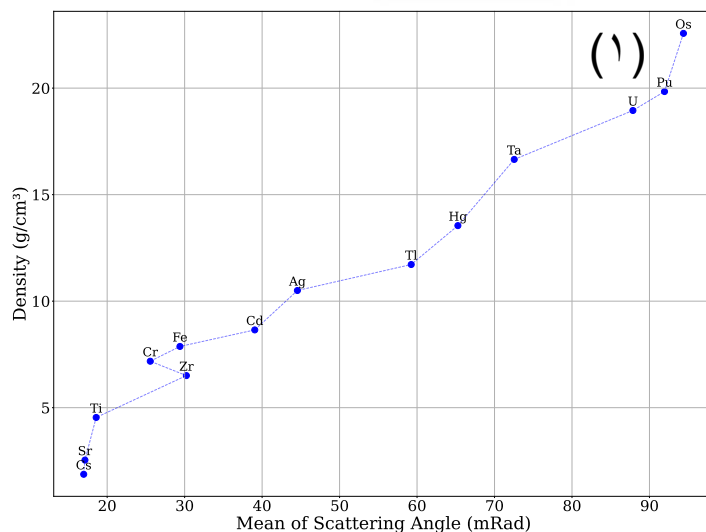
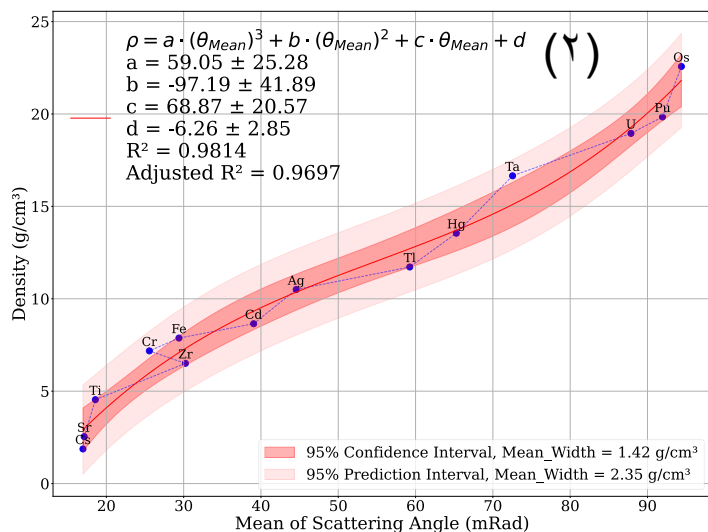
^{۹۹} Prediction Interval



جدول ۲: مقایسه مدل‌های برازش شده بر منحنی چگالی (ρ) به ازای میانگین زاویه پراکندگی میون (θ_{Mean}).

میانگین خطای نسبی	میانگین PI (g/cm ³)	میانگین CI (g/cm ³)	Adjusted R ²	R ²	پارامترها	مدل‌های برازش شده
٪ ۱۰٫۷۱	۲٫۳۵	۱٫۴۲	۰٫۹۶۹۷	۰٫۹۸۱۴	$a = 59.05 \pm 25.28$ $b = -97.19 \pm 41.89$ $c = 68.87 \pm 20.57$ $d = -6.26 \pm 2.85$	$\rho = a.(\theta_{Mean}^3) + b.(\theta_{Mean}^2) + c.(\theta_{Mean}) + d$
٪ ۱۳٫۲۷	۲٫۴۳	۱٫۲۶	۰٫۹۶۵۰	۰٫۹۷۱۰	$a = 22.33 \pm 0.74$ $b = 1.01 \pm 0.07$	$\rho = a. \theta_{Mean}^b$
٪ ۱۳٫۴۹	۲٫۵۵	۱٫۱۶	۰٫۹۶۶۰	۰٫۹۷۱۲	$a = 22.56 \pm 1.12$ $b = -0.24 \pm 0.64$	$\rho = a. \theta_{Mean} + b$
٪ ۱۳٫۴۹	۲٫۵۹	۱٫۵۱	۰٫۹۶۲۶	۰٫۹۷۱۱	$a = -0.04 \pm 5.9$ $b = 22.6 \pm 6.56$ $c = -0.25 \pm 1.46$	$\rho = a.(\theta_{Mean}^2) + b.(\theta_{Mean}) + c$
٪ ۲۹٫۱۵	۳٫۴۱	۱٫۹۵	۰٫۹۳۲۱	۰٫۹۴۲۶	$a = 3.8 \pm 0.47$ $b = 1.87 \pm 0.15$	$\rho = a. \exp(b. \theta_{Mean})$

نتایج برازش مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل چندجمله‌ای درجه سوم با ضریب تعیین ۰٫۹۸۱۴، میانگین خطای مطلق g/cm³ ۱٫۱۷ و میانگین خطای نسبی ۱۰٫۷۱٪ بالاترین تطابق را با داده‌های شبیه‌سازی شده دارد. این مدل با داشتن انعطاف‌پذیری بالا، قادر به توصیف دقیق‌تر انحناهای رابطه بین چگالی و زاویه پراکندگی بوده است. با توجه به اینکه خطای مطلق این مدل g/cm³ ۱٫۱۷ است، می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به دقت بالایی در تشخیص مواد دارند، به‌طور مؤثری استفاده شود. در مقایسه، مدل خطی درجه اول با R² برابر ۰٫۹۷۱۰ و خطای مطلق g/cm³ ۱٫۲۷ نیز تطابق بسیار خوبی با داده‌ها نشان داده است. این مدل با سادگی و قابلیت تفسیر آسان، برای کاربردهایی که نیاز به سرعت و کارایی دارند، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. مدل‌های دیگر، از جمله مدل چندجمله‌ای درجه دوم، مدل توانی و مدل نمایی، همگی ضریب تعیین کمتری نسبت به دو مدل مطرح شده داشتند (به ترتیب ۰٫۹۷۱۱، ۰٫۹۷۱۰ و ۰٫۹۴۲۶). این کاهش در R² نشان‌دهنده دقت کمتر این مدل‌ها در تطابق با داده‌ها است. لازم به ذکر است، نتایج حاصل از این پژوهش برای موادی که چگالی آن‌ها کمتر از سزیوم (Cs) است معتبر نیست، زیرا مواد با چگالی پایین‌تر به دلیل پراکندگی کمتر نمی‌توانند به خوبی بر اساس زاویه پراکندگی شناسایی شوند.



شکل ۳: نمودار چگالی مواد برحسب میانگین زاویه پراکندگی به همراه مدل‌های برازش‌شده.



۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از کد شبیه‌سازی مونت کارلو Geant4 برای بررسی زاویه پراکندگی میون‌ها هنگام عبور از عناصر مختلف استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که یک رابطه معنادار بین چگالی مواد و زاویه پراکندگی میون‌ها وجود دارد. به‌طوری که با کاهش چگالی ماده، زاویه پراکندگی میانگین میون‌ها نیز کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که مواد با چگالی بالاتر، به دلیل تعداد بیشتر اتم‌ها در واحد حجم، احتمال برخورد و پراکندگی میون‌ها را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، مواد چگال‌تری همچون اوسمیوم و پلوتونیوم زاویه‌های پراکندگی بیشتری را نسبت به موادی با چگالی پایین‌تر مانند استرانسیم و سزیوم نشان می‌دهند.

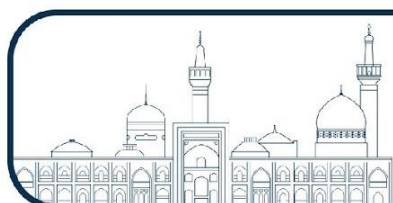
در این مطالعه، پنج مدل ریاضی شامل چندجمله‌ای درجه سوم، چندجمله‌ای درجه دوم، مدل خطی، مدل نمایی و مدل توانی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده برازش شدند. هدف اصلی از این مدل‌سازی، ایجاد رابطه دقیقی میان چگالی مواد و میانگین زاویه پراکندگی میون‌ها بود تا امکان شناسایی دقیق مواد بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده و زمان‌بر فراهم آید. نتایج نشان داد که مدل چندجمله‌ای درجه سوم با ضریب تعیین 0.9814 ، میانگین خطای مطلق 1.17 g/cm^3 و میانگین خطای نسبی 10.71% بهترین تطابق را با داده‌ها داشته و دقت بالایی در پیش‌بینی تغییرات چگالی مواد ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد تعیین چگالی مواد با استفاده از توموگرافی پراکندگی میون با درصد خطا نسبی قابل قبولی امکان‌پذیر می‌باشد.

۵- مراجع

- [۱] L. Frazão, J. J. Velthuis, S. Maddrell-Mander, and C. Thomay, "High-resolution imaging of nuclear waste containers with Muon Scattering Tomography," *J. Instrum.*, vol. ۱۴, no. ۰۸, pp. P۰۸۰۰۵–P۰۸۰۰۵, Aug. ۲۰۱۹, doi: ۱۰.۱۰۸۸/۱۷۴۸-۰۲۲۱/۱۴/۰۸/P۰۸۰۰۵.
- [۲] R. M. Barnett *et al.*, "Review of Particle Physics," *Phys. Rev. D*, vol. ۵۴, no. ۱, Jul. ۱۹۹۶, doi: ۱۰.۱۱۰۳/PhysRevD.۵۴.۱.
- [۳] A. M. SACHS and A. SIRLIN, "Muon Decay," *Muon Phys.*, pp. ۴۹–۸۱, ۱۹۷۵, doi: ۱۰.۱۰۱۶/b۹۷۸-۰۰۱۲-۳۶۰۶۰۲۰۰,۵۰۰۰۸-۷.
- [۴] S. Ip, "The Decay of Muons", [Online]. Available: <https://www.ucl.ac.uk/~zcapg۶۶/work/Muon.pdf>
- [۵] A. Georgadze, "Optimization Study of a Muon Tomography System for Imaging of Nuclear Waste Containers," *Acta Phys. Pol. A*, vol. ۱۴۲, no. ۳, pp. ۳۹۱–۳۹۸, Sep. ۲۰۲۲.
- [۶] M. Dobrowolska, J. Velthuis, A. Kopp, M. Perry, and P. Pearson, "Towards an application of muon scattering tomography as a technique for detecting rebars in concrete," *Smart Mater. Struct.*, vol. ۲۹, no. ۵, May ۲۰۲۰, doi: ۱۰.۱۰۸۸/۱۳۶۱-۶۶۵X/ab۷a۳f.
- [۷] E. Preziosi *et al.*, "TECNOMUSE: a novel, RPC-based, muon tomography scanner for the control of container terminals," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. ۱۵۴۸, no. ۱, p. ۰۱۲۰۲۱,

May ۲۰۲۰, doi: ۱۰,۱۰۸۸/۱۷۴۲-۶۵۹۶/۱۵۴۸/۱/۰۱۲۰۲۱.

- [۸] B. K. Sirasva, S. Jena, and R. Gupta, “Study of density independent scattering angle and energy loss for low- to high-Z material using Muon Tomography,” ۲۰۲۳, doi: ۱۰,۴۸۵۵۰/arXiv.۲۳۰۲,۰۰۴۴۷.



ساخت $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ به منظور دزیمتری ترمولومینسانس نوترون (کد مقاله: ۱۳۳۹)

مجیری فروشانی، روح‌اله^{۱*}، تاتاری، منصوره^{۱*}، اثباتی، طاهره^۲ -

۱- دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

۲- دانشگاه تهران، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

دزیمتری نوترون به دلیل اثر بیولوژیکی نسبی بالای نوترون‌ها نسبت به سایر پرتوهای یونیزان از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از دزیمترهای مورد استفاده در این زمینه، دزیمتر LiF:Mg,Ti است که محدودیت‌هایی از جمله منحنی درخشندگی پیچیده و از دست دادن حساسیت در استفاده مجدد دارد. بنابراین نیاز برای تولید و توسعه مواد جدید در این زمینه احساس می‌گردد. دسته جدیدی از مواد با ساختار پروسکایت بر پایه بورات به تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به LiMgBO_3 اشاره نمود. با ناخالصی‌های مختلف به منظور دزیمتری ترمولومینسانس نوترون و گاما پیشنهاد شده است. در این پژوهش LiMgBO_3 به صورت خالص و با ناخالصی Tb به منظور دزیمتری نوترون فردی به روش سل ژل تولید و غلظت بهینه Tb تحت تابش نوترون‌های حرارتی مشخص شد. با استفاده از آنالیز XRD ساختار و شکل بلوری ذرات تولید شده به دست آمد. همچنین برای ریخت‌شناسی نمونه‌ها از تصویر FESEM استفاده گردید و توسط آنالیز EDS از وجود ناخالصی Tb داخل نمونه‌ها اطمینان حاصل شد. در نهایت منحنی درخشندگی ترمولومینسانس برای این نمونه تحت تابش نوترون حرارتی به دست آمد.

کلمات کلیدی: دزیمتر، نوترون، لیتیم منیزیم بورات، ترمولومینسانس، سل ژل

Synthesis of $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ for the neutron thermoluminescence dosimetry

Mojiri Foroushani, Rouholah^{۱*}, Tatari, Mansoureh^{۱*}, Esbati, Tahereh^۲,

۱. Yazd University, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics

۲. Tehran University, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics

Abstract:

Neutron dosimetry is important due to neutrons' relatively high biological effect compared to other ionizing radiation. One of the dosimeters used in this field is the LiF:Mg,Ti dosimeter, which has limitations including a complex glow curve and loss of sensitivity on reuse. Therefore, there is a need to produce and develop new materials in this field. A new class of materials with a borate-based perovskite structure has recently attracted attention, including LiMgBO_3 . The LiMgBO_3 with various impurities has been proposed for neutron and gamma thermoluminescence dosimetry.

In this research, LiMgBO_3 was produced in pure form and with the Tb impurity for individual neutron dosimetry by sol-gel method and the optimal concentration of Tb was determined under thermal neutron irradiation. The crystal structure and shape of the produced particles were obtained using the XRD analysis. The FESEM images were also used to characterize the morphology of the samples, and the EDS analysis confirmed the presence of the Tb impurity inside the samples. Finally, the thermoluminescence glow curve was obtained for this sample under thermal neutron irradiation.

Keywords: Dosimeter, Neutron, LiMgBO_3 , Thermoluminescence, Sol-gel.



۱- مقدمه:

ترمولومینسانس (^{100}TL) یکی از پرکاربردترین روش‌های تحقیقاتی است که در زمینه‌های مختلفی از جمله فوسفورسانس^{۱۰۱}، مهندسی شکاف نواری^{۱۰۲}، فتوسنتز و از همه مهم‌تر دزیمتری تابش کاربرد دارد [۱ و ۲]. در میان انواع پرتوهای یونساز، تابش نوترونی به خاطر اثر بیولوژیکی نسبی (^{102}RBE) بالا نسبت به سایر پرتوها از اهمیت زیادی برخوردار است. ترمولومینسانس در طول سال‌ها به عنوان یکی از روش‌های دزیمتری نوترون فردی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال روشی بسیار پیچیده و دارای چالش‌های زیادی است که به دلیل طیف گسترده انرژی نوترون‌ها و وابستگی شدید سطح مقطع واکنش آن‌ها به انرژی است. علاوه بر این در بیش‌تر محیط‌های کاری، پرتوهای گاما همراه با نوترون هستند که این شرایط را بحرانی‌تر می‌کند [۳-۶].

با وجود این پیچیدگی‌ها، تاکنون معمولاً از موادی بر پایه LiF برای این منظور استفاده شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۶۱ کامرون^{۱۰۴} از LiF به منظور دزیمتری ترمولومینسانس استفاده کرد [۷]. پس از آن جفت دزیمتر $TLD-600$ و $TLD-700$ به عنوان دزیمترهای نوترون فردی معرفی شدند [۸ و ۹]. همچنین $LiF:Mg,Cu,P$ نیز برای این منظور توسط چندین محقق مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. با این حال این دزیمترها معایب زیادی از جمله ساختار پیچیده منحنی درخشندگی، روش پیچیده بازپخت و از دست دادن حساسیت پس از چندین بار استفاده می‌باشند [۱۱]. بنابراین زمینه زیادی برای توسعه مواد جدید و کارآمدتر برای دزیمتری نوترون فردی بر پایه ترمولومینسانس وجود دارد.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی روی ساختارهای پروسکایت بر پایه بورات انجام گرفته است که علت آن می‌توان به سادگی آماده‌سازی، شکاف نواری پهن و درخشندگی خوب آن‌ها اشاره نمود. با توجه به این موارد به تازگی تحقیقاتی مبنی بر توسعه مواد ترمولومینسانس بر پایه بورات به عنوان جایگزینی برای دزیمتر نوترون $LiF:Mg,Ti$ صورت گرفته است. یکی از این مواد، پروسکایت $LiMgBO_3$ است. پروسکایت $LiMgBO_3$ یکی از سبک‌ترین اعضای خانواده بورات‌های فلزی مخلوط است ($MM'BO_3$ که در آن $M=Li, Na, K$ و $M'=Be, Mg, Ca, Sr, Ba$) و بلوک اصلی ساختار یک واحد مسطح $[BO_3]^{3-}$ است که الکترون‌های ظرفیتی بسیار موضعی، قطبش پذیری ناهمسانگرد، کیفیت نوری بالا و جذب کم طول موج را ارائه می‌دهد [۱۲ و ۱۳].

در تحقیقات اخیر محققین مختلفی $LiMgBO_3$ خالص و با ناخالصی را به دلیل خواص ساختاری و الکتریکی، خواص لومینسانس و کاربردهای آن به عنوان کروموفورهای رنگی و در دیودهای تولید کننده نور قرمز گزارش کرده‌اند [۱۴ و ۱۵]. تاکنون گزارش‌هایی در مورد مطالعات دزیمتری ترمولومینسانس بر روی $LiMgBO_3:Dy$ برای پرتوهای بتا و گاما وجود دارد که حساسیت کم به نوترون و محوشدگی زیاد استفاده عملی از آن را محدود کرده است. با تغییر ناخالصی از Dy به Tb و ساخت

^{۱۰۰} Thermoluminescence

^{۱۰۱} Phosphorescence

^{۱۰۲} Band gap engineering

^{۱۰۳} Relative biological effectiveness

^{۱۰۴} Cameron



$\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$ نه تنها بر کاستی‌های فوق غلبه کرده، بلکه نتایج بسیار امیدوار کننده‌ای را نیز ارائه می‌دهد که ممکن است یک جایگزین برای LiF:Mg,Ti نیز باشد. علت استفاده از Tb به دو دلیل است: اول به دلیل تولید نور سبز که با بیش‌تر ^{105}PMT های مورد استفاده در دستگاه‌های قرائتگر ترمولومینسانس همخوانی دارد. دوم و مهم‌تر از همه، ناخالصی Tb معمولاً مراکز دام عمیقی در مواد میزبان ایجاد می‌کند که منجر به دمای نسبتاً بالا و قله درخشندگی ترمولومینسانس پایدار می‌شود که برای کاربردهای دزیمتری ترمولومینسانس بسیار مطلوب است [۱۶].

در این پژوهش پروسکایت LiMgBO_3 به صورت خالص و با ناخالصی Tb به منظور دستیابی به دزیمتر ترمولومینسانس نوترون فردی، تولید و خواص ساختاری، ریخت‌شناسی و منحنی درخشندگی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش کار:

۲-۱- مواد مورد نیاز:

کلیه مواد استفاده شده با بالاترین خلوص و ساخت شرکت مرک به شرح زیر است:
لیتیم استات دی‌هیدرات ($\text{CH}_3\text{COOLi} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، منیزیم کلرید (MgCl_2)، تربیم اکسید (Tb_4O_7)، بوریک اسید (H_3BO_3)، سیتریک اسید ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)، اتیلن گلیکول (CH_2OH)، نیتریک اسید (HNO_3)، آب دوبار تقطیر (H_2O).

۲-۲- روش ساخت:

دزیمتر $\text{LiMgBO}_3:\text{xTb}^{3+}$ که در آن ($\text{x}=0, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06 \text{ mol}$) به روش سل‌ژل و به صورت زیر تولید شد:

ابتدا مقادیر استوکیومتری لیتیم استات و منیزیم کلرید وزن شده و داخل ۸۰ میلی‌لیتر آب حل شد. سپس با توجه به غلظت مورد نیاز از Tb_4O_7 به عنوان ناخالصی در نیتریک اسید حل کرده و به محلول فوق اضافه نمودیم. در بشر دیگری محلول آبی بوریک اسید را آماده کرده و به محلول آماده شده تحت همزدن مداوم اضافه نمودیم. به این محلول نترات فلزی (^{106}MN) می‌گوییم. دمای محلول MN را به 80°C رسانده و در همین حین محلول آبی سیتریک اسید (^{107}CA) را آماده کرده و به همراه اتیلن گلیکول (^{108}EG) با نسبت مولی MN:CA و MN:EG برابر ۱:۱ و ۱:۲ به محلول MN به آرامی افزودیم. دمای محلول شفاف به دست آمده را در 80°C ثابت نگه داشته و پس از ۸ ساعت همزدن توسط همزن مغناطیسی مشاهده کردیم که بخارات قهوه‌ای رنگ از محلول خارج شده و در نهایت ژل سفید رنگ چسبناکی به دست آمد. این ژل را برای مدت ۱۲ ساعت داخل آون با دمای 200°C قرار داده تا خشک شود. در این حالت نمونه پف کرده و به رنگ قهوه‌ای تیره درآمد و خشک شد. نمونه حاصل را به وسیله هاون عقیق آسیاب کرده و درون بوته آلومینا ریختیم و برای مدت ۴ ساعت داخل کوره با دمای 800°C قرار دادیم تا کلسینه شود. در این حالت رنگ نمونه‌ها به سفید تغییر کرده و پس از آسیاب کردن با آب داغ شستشو نمودیم و اجازه دادیم تا در دمای محیط خشک شود.

^{۱۰۵} Photomultiplier tube

^{۱۰۶} Metal nitrate

^{۱۰۷} Citric acid

^{۱۰۸} Ethylene glycol



۲-۳- پرتودهی:

قبل از ارسال نمونه‌ها برای پرتودهی ابتدا آن‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 300°C داخل کوره حرارت داده و سپس مقدار 0.2 گرم از هر نمونه را به صورت پودر به مدت ۳۰ روز در معرض چشمه Am-Be تحت تابش نوترون‌های حرارتی قرار دادیم. برای رسم منحنی درخشندگی از دستگاه قرائتگر ترمولومینسانس مدل REXONUL-320 استفاده نمودیم. به این صورت که یک روز پس از اتمام پرتودهی مقدار 0.2 گرم از هر نمونه پرتودهی شده را به صورت پودر داخل محفظه دستگاه ریخته و طیف منحنی درخشندگی ترمولومینسانس را به دست آوردیم.

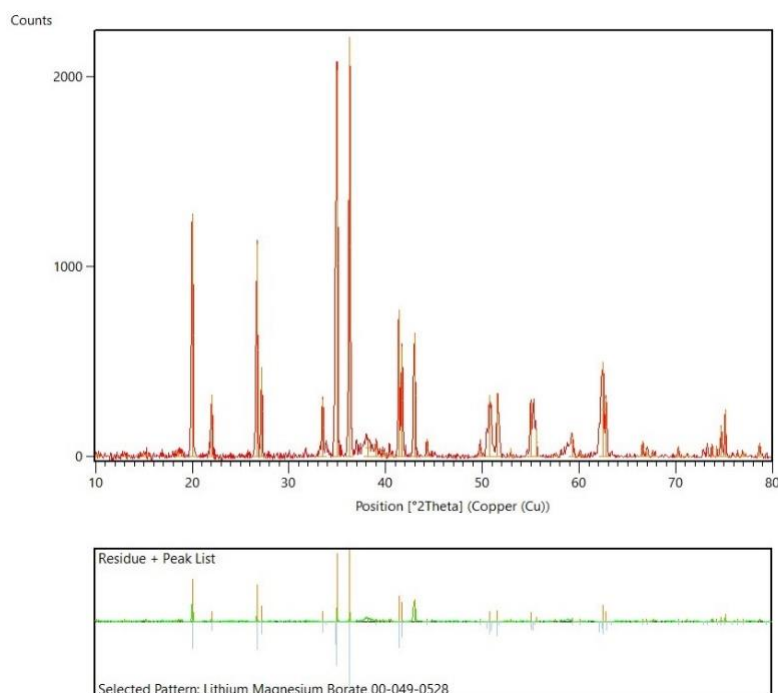
۳- نتایج:

۳-۱- طیف XRD:

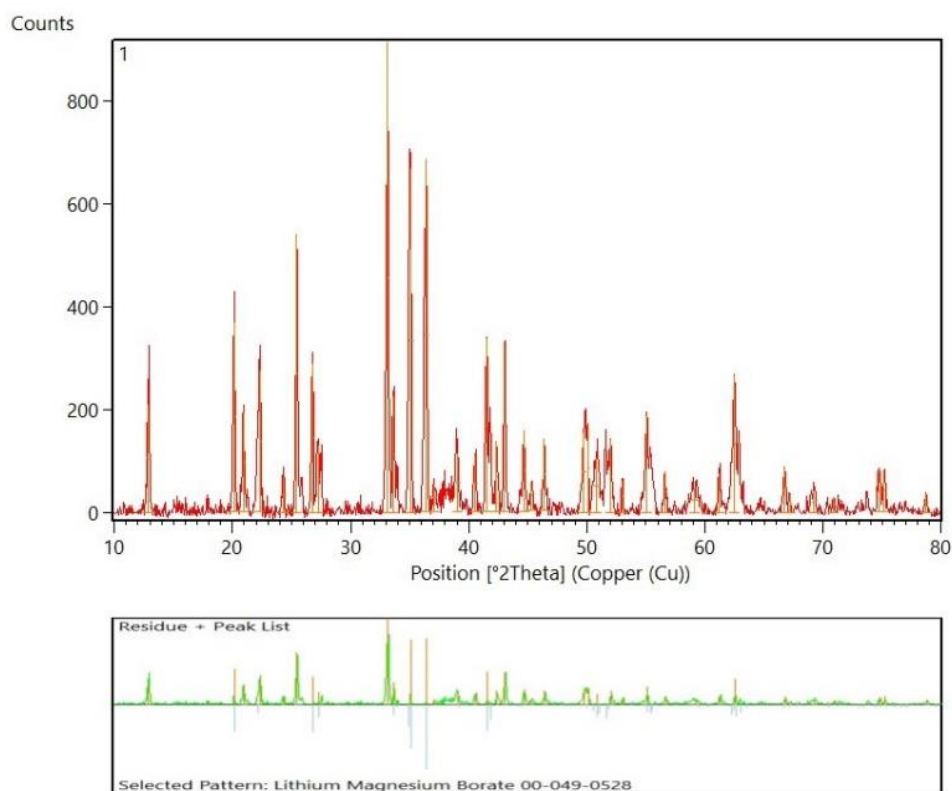
به منظور اطمینان از ایجاد ساختار مورد نظر و بررسی شکل بلور از نمونه LiMgBO_3 بدون ناخالصی و با ناخالصی Tb طیف XRD گرفته شد که می‌توان در شکل‌های ۱ و ۲ آن‌ها را مشاهده کرد. طیف XRD نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پراش پرتو X با طول موج 1.54 آنگستروم تعیین گردید که به خوبی تشکیل ساختار LiMgBO_3 را با ساختار شبکه مونوکلینیک تأیید نمود. با استفاده از رابطه دبی-شرر (رابطه ۱) اندازه متوسط بلورک‌های ایجاد شده برای نمونه LiMgBO_3 برابر 39 نانومتر و نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$ برابر 28 نانومتر به دست آمد.

$$D = k \frac{\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

که در آن D ، λ ، β و 2θ به ترتیب اندازه بلور، پهنای کل در نصف ارتفاع بیشینه، طول موج پرتو X مورد استفاده در دستگاه پراش پرتو X و زاویه پراش در شدیدترین قله می‌باشد. k نیز یک مقدار ثابت است که به شکل و اندازه بلور بستگی دارد.



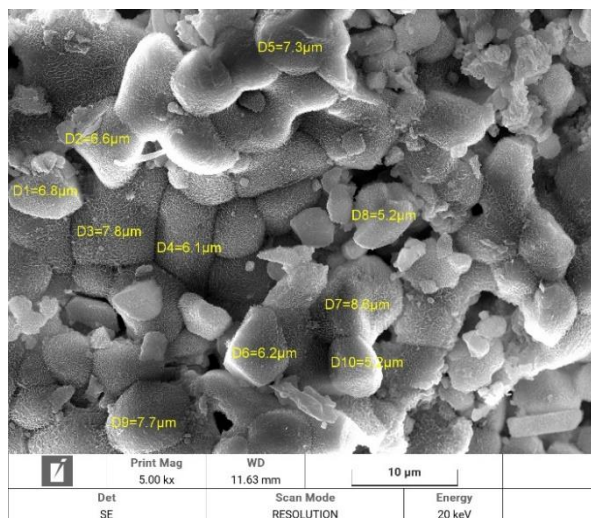
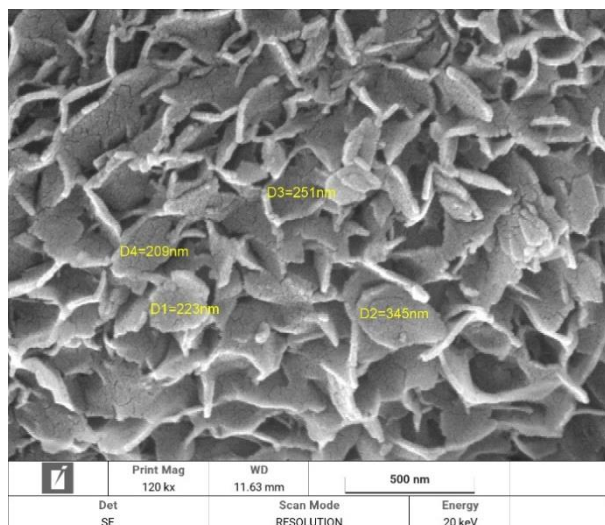
شکل (۱۱) طیف XRD نمونه LiMgBO_3



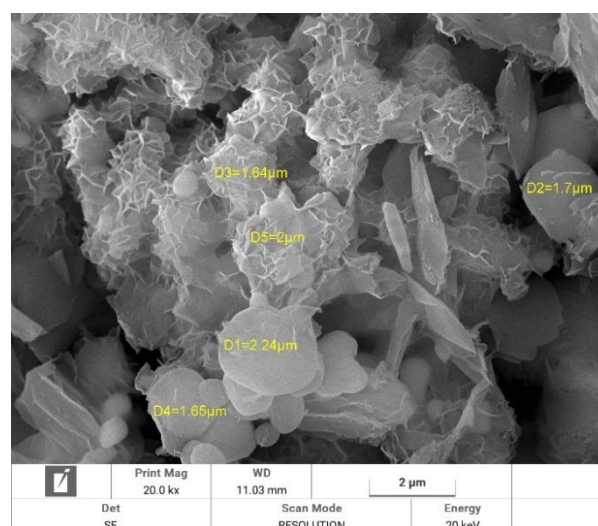
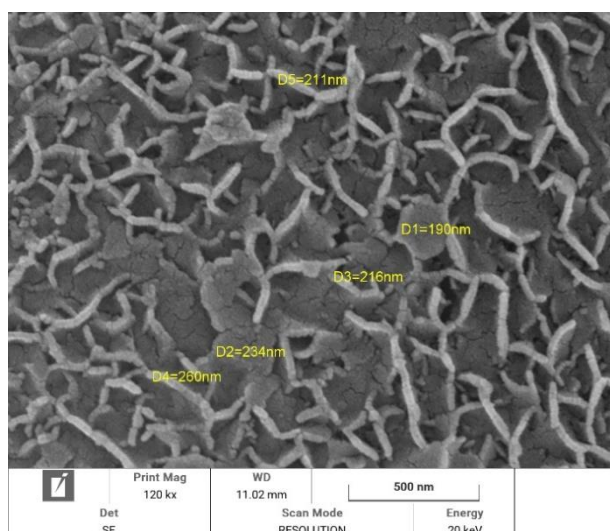
شکل (۱۲) طیف XRD نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$

۳-۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی (FESEM):

به منظور بررسی ریخت‌شناسی نمونه‌ها، از آن‌ها تصویر میکروسکوپ الکترونی (FESEM) گرفته شد. در شکل ۳ تصویر نمونه LiMgBO_3 و در شکل ۴ تصویر نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$ را می‌توان مشاهده نمود. مشاهده می‌شود که نمونه LiMgBO_3 از ذراتی با اندازه متوسط ۶ میکرومتر تشکیل شده است که خود این ذرات نیز دارای ساختار صفحه‌ای با اندازه متوسط ۲۳۰ نانومتر هستند. نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$ دارای ذراتی با اندازه متوسط ۲ میکرومتر است که این ذرات از صفحاتی با اندازه ۲۱۰ نانومتر تشکیل شده است.



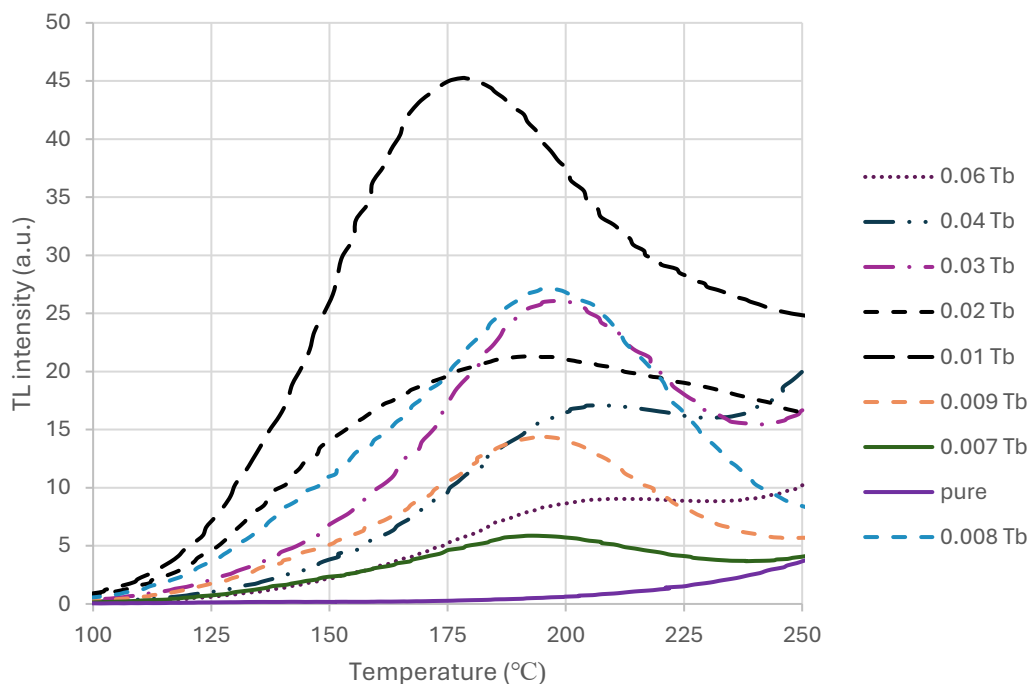
شکل (۳) تصویر FESEM نمونه LiMgBO_3



شکل (۴) تصویر FESEM نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$

۳-۳- تعیین غلظت ناخالصی Tb:

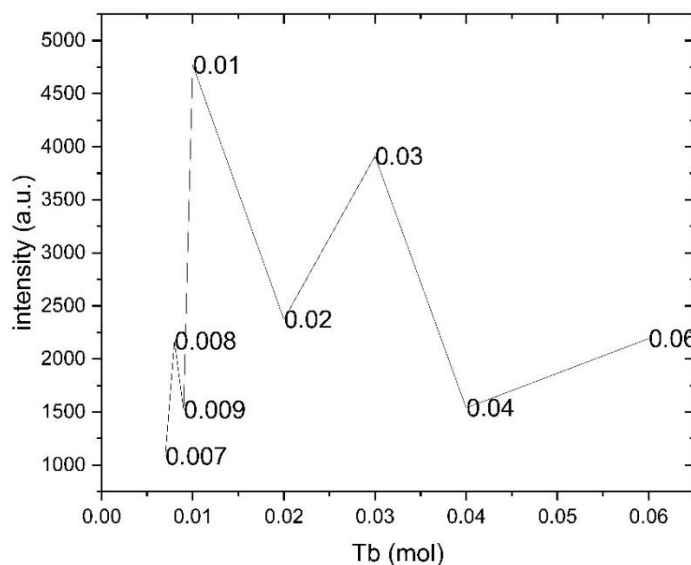
به منظور تعیین غلظت ناخالصی Tb در نمونه‌های تولید شده، پس از پرتودهی آن‌ها توسط نوترون‌های حرارتی منحنی درخشندگی هر یک رسم و با استفاده از سطح زیر منحنی شدت درخشندگی هر کدام به دست آمد. در شکل ۳ می‌توان منحنی درخشندگی LiMgBO_3 خالص و با ناخالصی Tb با غلظت‌های مختلف را با هم مقایسه نمود.



شکل (۱۳) منحنی درخشندگی LiMgBO_3 خالص و با غلظت‌های متفاوت Tb

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نمونه‌ها دارای قله‌ای در دمای 175°C و 196°C هستند که این دو قله در غلظت‌های مختلف با هم همپوشانی دارند. همچنین نمونه بدون ناخالصی دارای هیچ قله‌ای در محدوده مجاز نیست که اهمیت وجود ناخالصی را نشان می‌دهد. علت ایجاد قله‌ها را می‌توان به این صورت شرح داد: تابش نوترون منجر به ایجاد ذرات باردار با انتقال انرژی خطی بالا و به دنبال آن تشکیل جفت الکترون-حفره می‌شود که توسط ناخالصی‌ها به دام می‌افتند. این الکترون‌ها که در دام گرفتار شده‌اند، پس از گرم شدن در طول اندازه‌گیری‌های ترمولومینسانس دوباره ترکیب شده و منجر به تولید فوتون‌های تابشی می‌گردند که به وسیله دستگاه قرائتگر ترمولومینسانس نمونه گرم شده و فوتون‌های تولیدی به جریان الکتریکی تبدیل می‌گردند و منحنی درخشندگی رسم می‌شود [۱۶].

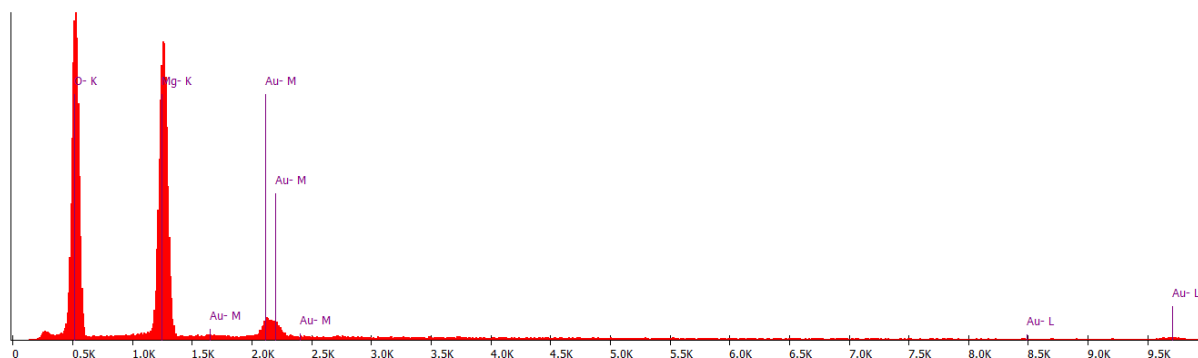
همچنین در شکل ۴ مقایسه میزان درخشندگی غلظت‌های مختلف ناخالصی رسم شده است. چنان‌چه می‌توان مشاهده نمود بیش‌ترین شدت مربوط به غلظت 0.01 مول است.



شکل (۱۴) مقایسه شدت درخشندگی بر حسب تغییر غلظت ناخالصی Tb

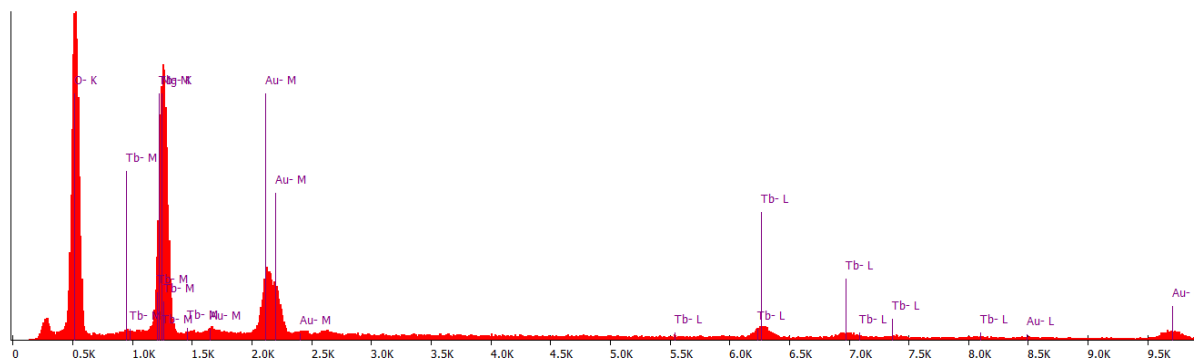
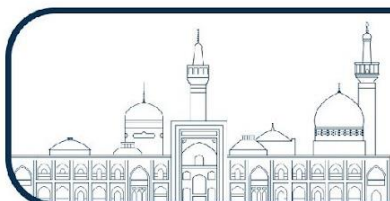
۳-۴- آنالیز EDS:

برای اطمینان از وارد شدن ناخالصی به ساختار ماده، از نمونه‌های تولید شده آنالیز EDS گرفته شد. در شکل ۵ آنالیز EDS مربوط به نمونه LiMgBO_3 و در شکل ۶ آنالیز EDS نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$ مشاهده می‌شود. این آنالیزها وجود تربیم به عنوان ناخالصی در نمونه را اثبات می‌کند. در این طیف‌ها غلظت ناخالصی با غلظت منیزیم مقایسه شده است که داریم: $\text{Li}(1-x)\text{MgBO}_3:x\text{Tb}$



Element	Atomic %	Weight %
Oxygen	67.53%	57.79%
Magnesium	32.47%	42.21%

شکل (۵) آنالیز EDS نمونه LiMgBO_3



Element	Atomic %	Weight %
Oxygen	72.9%	55.91%
Magnesium	25.16%	29.32%
Terbium	1.94%	14.78%

شکل (۶) آنالیز EDS نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}$

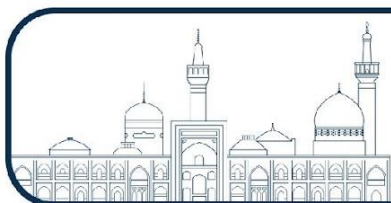
۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش نمونه $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ با موفقیت تولید شد و منحنی درخشندگی، تحت تابش نوترون‌های حرارتی بدست آمد. مشاهده شد که با وارد کردن ناخالصی Tb در ساختار، قله‌ای با شدت زیاد در دمای 175°C و 196°C ایجاد می‌شود. شکل منحنی درخشندگی ساده، حساسیت خوب نسبت به تابش نوترون و روش ساده تولید از جمله ویژگی‌های این ماده به حساب می‌آیند که می‌توان به عنوان گزینه‌ای برای دزیمتری نوترون فردی در نظر گرفت. سایر پارامترهای دزیمتری این نمونه نیز در دست بررسی است.

۵- مراجع:

- [۱] F. Daniels, C. Boyd and D. Saunders, *Science*, 1953, 117, 343–349.
- [۲] S. W. S. McKeever, *Thermoluminescence of Solids*, Cambridge, UK, 1985.
- [۳] S. Zhang, Z. Song, S. Wang, Z. Wang, F. Wang and Q. Liu, *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8, 4956–4964.
- [۴] T. Lyu and P. Dorenbos, *Chem. Mater.*, 2020, 32, 1192–1209.
- [۵] G. Repetto, J. L. Zurita, M. Roncelb and J. M. Ortega, *Aquat. Toxicol.*, 2015, 158, 88–97.
- [۶] J. F. Fowler, E. Shuttleworth, V. Svarcer, J. T. White and C. J. Karzmark, *Nature*, 1965, 207, 997–998.
- [۷] J. R. Cameron, F. Daniels, N. M. Johnson and G. Kenney, *Science*, 1961, 134, 233.
- [۸] K. Ayyangar, A. R. Lakshmanan, B. Chandra and K. Ramadas, *Phys. Med. Biol.*, 1974, 19, 665–676.
- [۹] A. R. Lakshmanan, *Nucl. Tracks*, 1982, 6, 59–78.
- [۱۰] M. Budzanowski and B. Burghardt, *Radiat. Meas.*, 1995, 24, 445–448.

- [۱۱] J. I. Lee, J. S. Yang, J. L. Kim, A. S. Pradhan, J. D. Lee, K. S. Chung and H. S. Choe, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89, 094110.
- [۱۲] K. H. Prasad, S. Subramanian, T. N. Sairam, G. Amarendra, E. S. Srinadhu and N. Satyanarayana, *J. Alloys Compd.*, 2017, 718, 459–470.
- [۱۳] L. Zhijuan, M. Fuwang, Z. Xinguo and Z. Liya, *J. Lumin.*, 2014, 151, 47–51.
- [۱۴] S. Tamilarasan, S. Laha, S. Natarajan and J. Gopalakrishnan, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2016, 288–293. [۱۵] A. K. Bedyal, A. K. Kunti, S. G. Menon, V. Kumar and H. C. Swart, *J. Alloys Compd.*, 2020, 830, 154622.
- [۱۶] M. Sen, R. Shukla, N. Pathak, K. Bhattacharyya, V. Sathian, P. Chaudhury, S. Kulkarni and A. K. Tyagi, *Development of $\text{LiMgBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ as a new generation material for thermoluminescence based personnel neutron dosimetry*, Royal Society of Chemistry (2021).



تأثیر افزودن ناخالصی‌ها بر ماده ترمولومینسانس $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ و بررسی خواص آن (کد مقاله :

(۱۳۸۳

کردستانی، فرشاد^۱

۱- دانشگاه حکیم سبزواری-سبزوار، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

لیتیوم بورات ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) با عدد اتمی موثر ($Z_{\text{eff}} = 7.3$) نزدیک به بافت بدن، ماده‌ای مناسب برای دزیمتری بالینی است. در پژوهش حاضر، از روش احتراق برای سنتز نمونه‌های لیتیوم بورات آلاییده شده با مس و منیزیم استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که در نمونه $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ با افزودن ناخالصی مس، منحنی درخشندگی آن کاملاً متفاوت از منحنی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ می‌باشد. پاسخ دُز برای لیتیوم بورات آلاییده شده با هر دو ناخالصی دارای بازه وسیعی از پاسخ خطی است. برای نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ محو شدگی کمتری نسبت به نمونه $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ مشاهده شد. بطور کلی از این بوراتها میتوان به عنوان یک ماده امیدوار کننده برای اهداف دزیمتری بالینی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: ترمولومینسانس، دزیمتر، سنتز، لیتیوم بورات

The effect of adding impurities on $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ thermoluminescence material and investigating its properties

Kordestani, farshad^{۱*}

۱. Hakim Sabzevari University, Base Science Faculty & Nuclear Physics Department

Abstract:

Lithium borate ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) with an effective atomic number ($Z_{\text{eff}} = 7.3$) close to that of body tissue is a suitable material for clinical dosimetry. In the present study, the combustion method was used to synthesize samples of lithium borate doped with copper and magnesium. The results showed that in the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ sample with the addition of copper impurity, its Glow curve is completely different from the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ curve. The dose response for lithium borate doped with both impurities has a wide range of linear response. Less fading was observed for $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ nanoparticles compared to the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ sample. Generally, these borates can be used as a promising material for clinical dosimetry purposes.

Key words: Thermoluminescence, Dosimeter, Synthesis, Lithium Borate



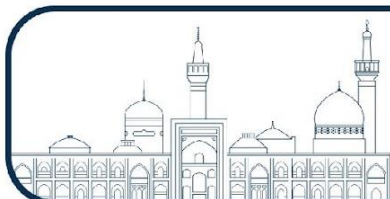
۱ - مقدمه:

گسیل نور بر اثر حرارت دادن ماده عایق یا نیمه‌رسانایی که قبلاً تحت تابش یونیزان قرار گرفته را پدیده ترمولومینسانس گویند [۱,۲]. مواد زیادی به عنوان یک ماده ترمولومینسانس مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مواد ترمولومینسانس معادل بافت بدن ($Z_{eff}=7.4$) بسیار کمی برای کاربردهای دُزیمتری پرتو، به ویژه در کاربردهای بالینی و پرتودرمانی وجود دارد [۳]. یکی از این مواد معادل بافت، $LiF:Mg,Ti$ است که دارای حساسیت بالا و محو شدگی کمی دارد و یکی از پرکاربردترین فسفرهای TL است [۴]. متأسفانه، منحنی درخشندگی TL این فسفر از قله‌های بیش از حد همپوشانی تشکیل شده است و عملیات حرارتی پیچیده‌ای دارد که اجرای دُزیمتری را دشوار میکند [۵]. ماده دیگر TLD, BeO است که معادل بافت کامل با حساسیت بالا است که میتواند بدون بازسازی، مجدد مورد استفاده قرار گیرد، اما ماده‌های سمی، بسیار حساس به نور است [۶]. با این حال، برای جلوگیری از عوارض جانبی سمیت آن، به صورت سرامیک BeO استفاده میشود. ماده معادل بافت دیگر، $LiF:Mg,Cu,P$ میباشد که نسبت به تشعشع و عملیات حرارتی بسیار حساس است [۷]. علاوه بر این مواد، لیتیوم بورات ($Li_2B_4O_7$) به علت عدد اتمی موثر آن ($Z_{eff}=7.3$) که نزدیک به بافت بدن ($Z_{eff}=7.4$) میباشد، ماده‌های مناسب برای دُزیمتری بالینی است. این ماده به عنوان دُزیمتر ترمولومینسانس در مطالعات چندین دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است و مورد استفاده قرار گرفته است [۸,۹]. اولین ماده TL از این نوع، فسفر $Li_2B_4O_7:Mn$ با حساسیت TL پایین بود که با افزودن ناخالصی مس به جای منگنز در لیتیوم بورات، دُزیمتری خوب سازگار با دُزیمتر تجاری بدست آمد [۱۰,۱۱]. در این پژوهش به بررسی و تحلیل مقالات ساخت نانوبلورهای لیتیوم بورات با افزودن ناخالصیهای مس و منیزیم به روش احتراقی و آنالیز خواص لومینسانس آنها نسبت به پرتوهای گاما پرداخته شده است.

۲ - روش کار:

محققان مطالعات زیادی در خصوص سنتز لیتیوم بورات به روش احتراقی انجام داده‌اند. در این پژوهش به بررسی و آنالیز نتایج دو مقاله‌های سینگ و همکاران [۱۱] و محرابی و همکاران [۱۲] جهت ساخت لیتیوم بورات با استفاده از روش سنتز احتراقی خواهیم پرداخت. روش کار این مقالات با روش سنتز احتراقی بود که از مواد اولیه لیتیوم نیترات، اسید بوریک، اوره، نیترات آمونیوم با نسبت مولی $Li(NO_3):H_3BO_3:NH_4NO_3:NH_2CONH_2=2.0:3.2:10.2:10.2$ استفاده کردند. ابتدا مواد را در آسیاب ریخته و با هم مخلوط کردند تا کاملاً یکنواخت شوند. سپس ماده بدست آمده را در یک بوتله چینی ریخته و در کوره‌های که از قبل در دمای $580^\circ C$ گرم شده بود قرار دادند.

بعد از مدتی عمل احتراق صورت گرفته و فسفر مورد نظر تولید میشود. فسفر بدست آمده را خرد کرده و عملیات بازپخت انجام شد. پودر سفید رنگی بدست آمد که همان لیتیوم بورات است. با اضافه کردن مقادیر مناسب ناخالصیهای مس و منیزیم میتوان لیتیوم بورات آلاییده شده با مس یا منیزیم ساخت. دمای گرمادهی برای تهیه لیتیوم بورات آلاییده شده با منیزیم و مس به ترتیب $450^\circ C$ و $300^\circ C$ به مدت ۱۰ دقیقه بود که پس از تابش عملیات بازپخت در دمای $300^\circ C$ به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفت. از قرائتگرهای هارشاو مدل‌های ۴۵۰۰ و ۳۵۰۰ با نرخ گرمادهی $5^\circ C/s$ برای بدست آوردن منحنی درخشندگی و بررسی خواص ترمولومینسانس نانو ذرات استفاده شد.



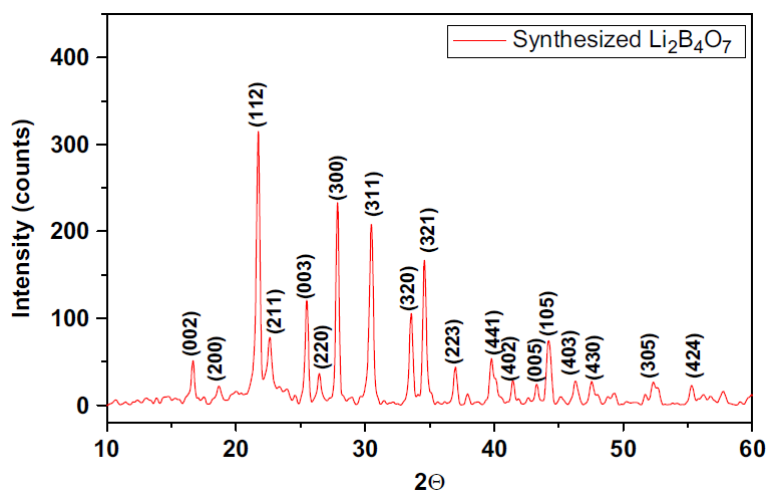
۳ - نتایج:

۳-۱- ساختار و اندازه ذرات

به منظور تایید تشکیل ترکیب در تحقیقات انجام گرفته از الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) مختلف استفاده شد. نتایج به دست آمده در هر دو تحقیق با داده‌های استاندارد (شماره کارتهای ۲۱۹۱-۸۴ و ۰۵۰۵-۴۰) مطابقت داشت (شکل ۱). اندازه ذرات را از روی پهنای نصف بیشینه قله XRD و فرمول شرر تخمین زدند.

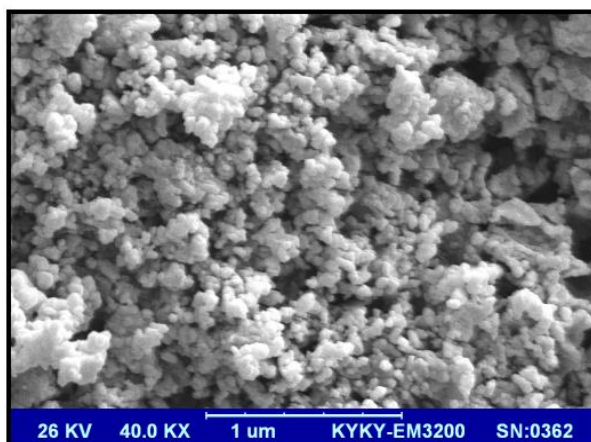
$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

که در آن، D میانگین اندازه ذرات، λ طول موج تابشی، β پهنای نصف بیشینه قله و θ زاویه براگ است. میانگین اندازه ذرات برای $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ لائیده شده با مس و منیزیم به ترتیب ۲۵ و ۳۴ نانومتر تخمین زده شدند.



شکل (۱) طیف XRD نانوذرات لیتیوم بورات

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که بلورهای ساخته شده ذراتی با ساختار نانو هستند.

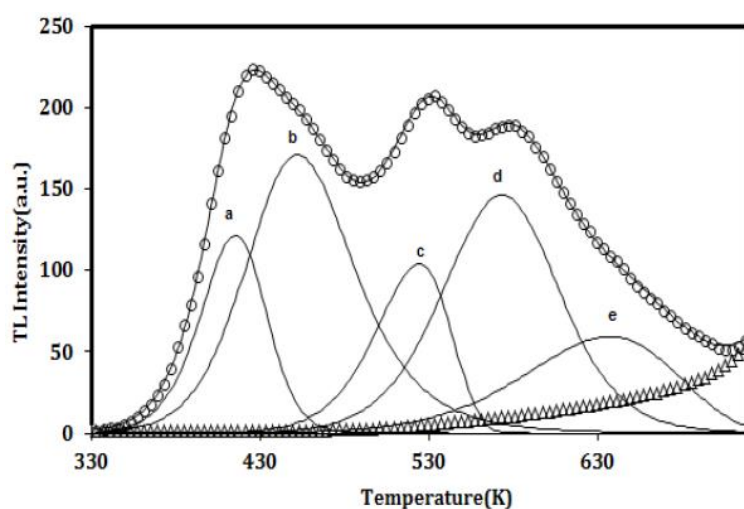


شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات لیتیوم بورات

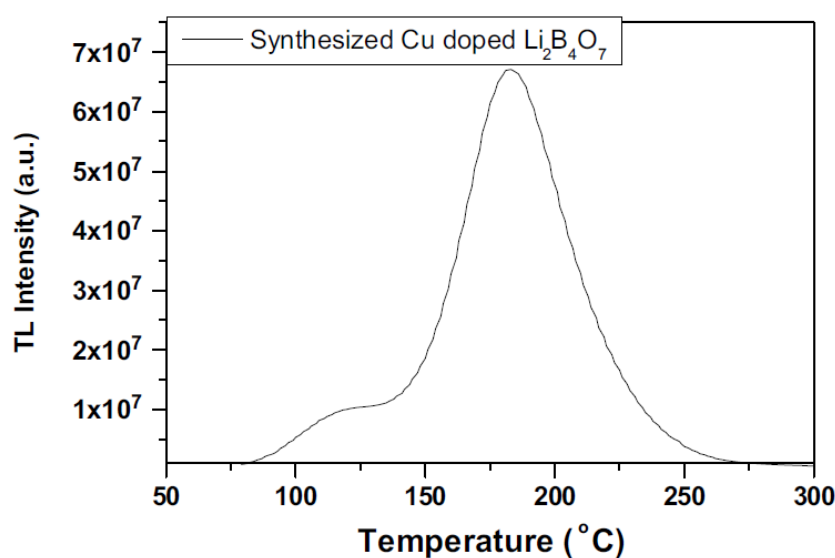


۳-۲- منحنی درخشندگی

برای بدست آوردن منحنیهای درخشندگی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ آلائیده شده با مس و منیزیم از پرتوهای گامای حاصل از چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co استفاده کردند. منحنی درخشندگی بدست آمده برای هر دو نانو ذرات را در زیر مشاهده میکنید. منحنی درخشندگی نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ نشان میدهد که منحنی برازش از همپوشانی ۵ منحنی بدست آمده که بیشترین شدت ترمولومینسانس مربوط به اولین قله منحنی برازش میباشد (شکل ۳). منحنی درخشندگی نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ بدست آمده کاملاً متفاوت با منحنی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ میباشد بطوری که بیشترین شدت ترمولومینسانس مربوط به قله در دمای 184°C است (شکل ۴).



شکل ۳) منحنی درخشندگی نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$



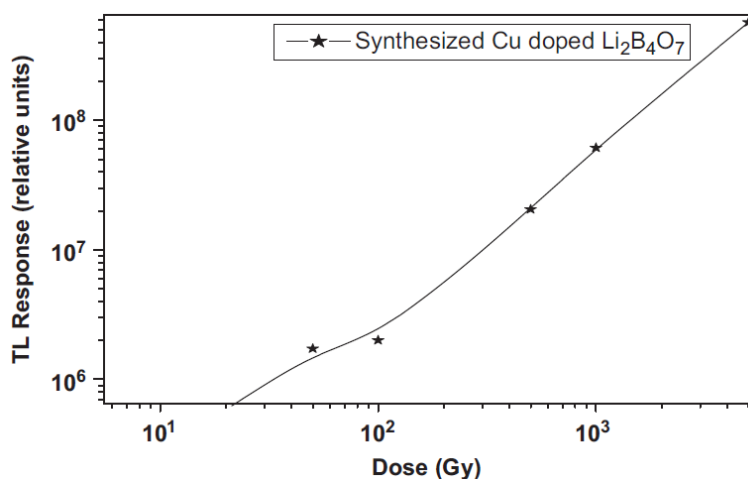
شکل ۴) منحنی درخشندگی نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$



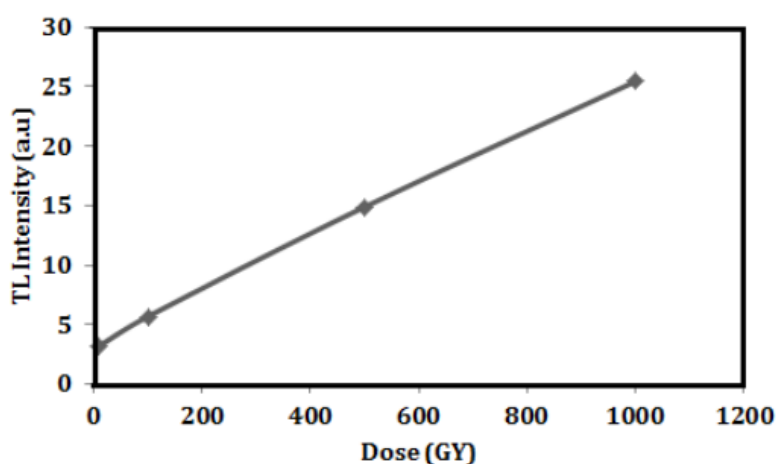
ناخالصیها نقش مهمی در کنترل خواص ترمولومینسانس لیتیوم بورات دارد. [۱۳،۱۴] در ادامه این پژوهش با بررسی تأثیر غلظتهای مختلف ناخالصیهای مس و منیزیم بر روی ترمولومینسانس، مشاهده شد که بیشترین شدت و بهینهترین غلظت برای ناخالصی مس و منیزیم به ترتیب ۰.۲۵ درصد وزنی و ۸ درصد مولی است.

۳-۳- پاسخ دُز

نتایج حاصل از پاسخ دُز و حساسیت برای هر کدام از دو نانو ذرات نشان میدهد که $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ در محدوده 10^3 Gy دارای پاسخ خطی و مشاهده شد $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ پاسخ خطی آن در بازه 10^3 - ۵ Gy میباشد. لیتیوم بوراتهای تهیه شده در دُزهای بیش از 10^3 Gy دارای رفتار فوق خطیاند.



شکل ۵) منحنی پاسخ دُز $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ نسبت به پرتو گاما

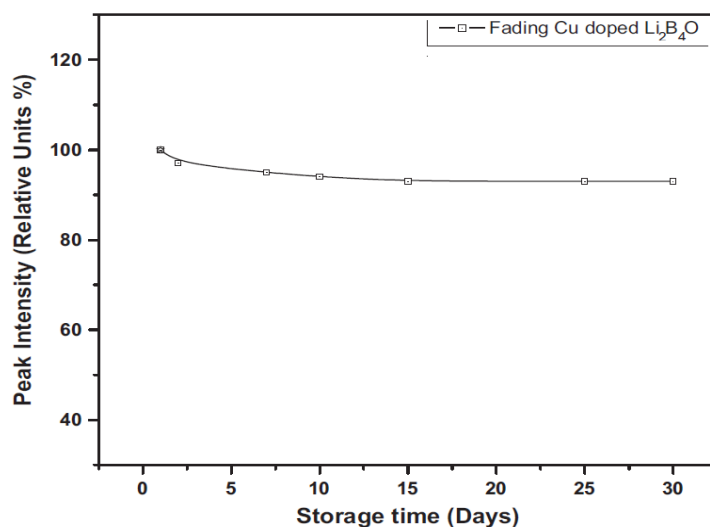


شکل ۶) منحنی پاسخ دُز $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ نسبت به پرتو گاما

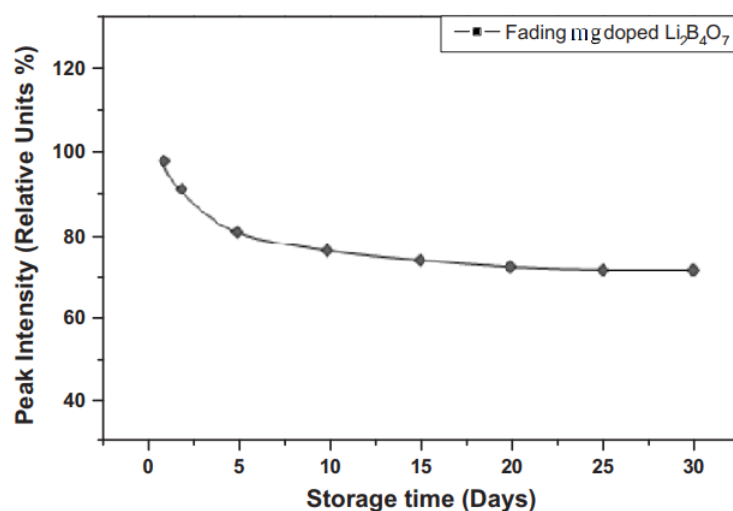


۳-۳- محو شدگی

پایداری و محو شدگی برای دو نمونه مورد بررسی انجام گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که محو شدگی برای $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ آلاینده شده با مس به ترتیب در روزهای دوم، هفتم و دهم به ترتیب ۰.۲٪، ۰.۵٪ و ۰.۶٪ است، در حالی که محو شدگی کل ثبت شده ۰.۷٪ می‌باشد. همچنین شکل ۸ نمودار محو شدگی نانوذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ را در طول مدت یک ماه نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده در این زمان، میزان محو شدگی ۳۱٪ است.



شکل ۷) منحنی محو شدگی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$



شکل ۸) منحنی محو شدگی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$

مقایسه منحنیهای نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ و $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$ به وضوح نشان می‌دهد که محو شدگی برای ناخالصی منیزیم نسبت به مس در بازه دوره یک ماهه بیشتر است.

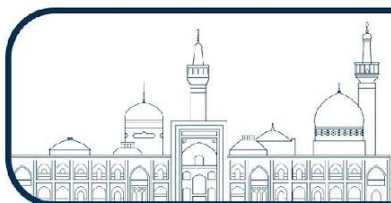


۴ - بحث و نتیجه گیری:

مواد زیادی به عنوان یک ماده ترمولومینسانس مورد استفاده قرار میگیرند، اما مواد ترمولومینسانس معادل بافت محدوداند که از جمله مواد معادل بافت میتوان به BeO ، LiF:Mg,Ti ، LiF:Mg,Cu,P اشاره کرد که تحقیقات زیادی از گذشته تا کنون بر روی این مواد انجام گرفته است. علاوه بر این مواد، لیتیوم بورات ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) با عدد اتمی موثر ($Z_{\text{eff}} = 7.3$) نزدیک به بافت بدن، مادهای مناسب برای دُزیمتری بالینی است. در پژوهش حاضر، از روش احتراق برای سنتز نمونههای لیتیوم بورات آلاییده شده با مس و منیزیم استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که در نمونه $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ با افزودن ناخالصی مس (۰.۲۵ درصد وزنی)، منحنی درخشندگی آن کاملاً متفاوت از منحنی $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mg}$ میباشد. پاسخ دُز برای لیتیوم بورات آلاییده شده با هر دو ناخالصی دارای بازه وسیعی از پاسخ خطی است. برای نانو ذرات $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ و $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mg}$ محو شدگی به ترتیب ۷٪ و ۳۱٪ مشاهده شد. بطور کلی از این بوراتها میتوان به عنوان یک ماده امیدوار کننده برای اهداف دُزیمتری بالینی استفاده کرد.

۵- مراجع:

- [۱] S.W.S. Mckeever, Thermoluminescence of Solids, Cambridge University, Cambridge, (۱۹۸۵).
- [۲] C. Furetta, Handbook of Thermoluminescence, World Scientific Pub, (۲۰۰۳).
- [۳] J.H. Schulman, R.D. Kirk, E.J. West, USAEC Symposium Series ۶۵۰۶۳۷, Luminescence Dosimetry, (۱۹۶۵), pp ۱۱۳-۱۱۷.
- [۴] P. Bilski, Lithium fluoride: from LiF:Mg,Ti to LiF:Mg,Cu,P , Radiat. Prot. Dosim, ۱۰۰ (۲۰۰۲), pp ۱۹۹-۲۰۵.
- [۵] V. Kortov, Materials for thermoluminescent dosimetry: current status and future trends, Radiat. Meas, ۴۲ (۲۰۰۷), pp ۵۷۶-۵۸۱.
- [۶] D.R. Vij, N. Singh, Thermoluminescence dosimetric properties of beryllium oxide, J. Mater. Sci. Lett, ۳۲ (۱۹۹۷), pp ۲۷۹۱-۲۷۹۶.
- [۷] M. Moscovitch, T.J.S. John, J.R. Cassata, P.K. Blake, J.E. Rotunda, M. Ramlo, K.J. Velbeck, L.Z. Luo, L.Z. The application of LiF:Mg,Cu,P to large scale personnel dosimetry: current status and future directions. Radiat. Protect. Dosim. ۱۱۹ (۲۰۰۶), pp ۲۴۸-۲۵۴.
- [۸] Z.Y. Xiong, C.X. Zhang & Q. Tang, Investigation of thermoluminescence in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ phosphors doped with Cu, Ag and Mg, Chinese Science Bulletin, ۵۲ (۲۰۰۷), pp ۱۷۷۶.
- [۹] S Nabadwip Sing. B Arunkumar Shamar & ASing, India n Journal of Pure & Applied Physics, ۵۰ (۲۰۱۲), pp ۳۵۸-۳۶۲.
- [۱۰] N.A. El-Faramawy, S.U. El-Kameesy, A.I. Abd El-Hafez, M.A. Hussein, G.E. Metwally, Egypt. J. Sol, ۲۳ (۲۰۰۰), pp ۱۰۳.
- [۱۱] L. Singh, V. Chopra, S.P. Lochab, Synthesis and characterization of thermoluminescent $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ nanophosphor, Journal of Luminescence, ۱۳۱ (۲۰۱۱), pp ۱۱۷۷-۱۱۸۳.
- [۱۲] محسن محرابی، مصطفی زاهدیفر، سهیلا حسنلو و احسان صادقی، ساخت نانو بلور لیتیوم بورات آلاییده با منیزیم به روش احتراقی و بررسی رفتار لومینسانس آن، مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱، شماره ۴، پاییز ۱۳۹۲.
- [۱۳] C. Furetta, C. Sonipoli, A. Scacco, K. Somaiah, Radiat. Prot. Dosim, ۶۵ (۱۹۹۶), pp ۳۳۹.
- [۱۴] B.T. Huy, V.X. Quang, H.T.B. Chau, J. Lumin, ۱۲۸ (۲۰۰۸), pp ۱۶۰۱.



بررسی ترابرد حاملین بار در آشکارسازهای نیمه‌رسانای سیلیکونی به روش شبیه‌سازی مونت

کارلو (کد مقاله : ۱۳۸۵)

علوی نسب اردبیلی، سید محمد امین - حمدی پور، محمد - نوری اصل، مهسا

دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

در این پژوهش، رفتار حاملین بار و ترابرد حاملین در آشکارسازهای نیمه‌رسانا و به طور خاص، آشکارسازهای بر پایه‌ی سیلیکون، به روش شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و با در نظر گرفتن ساختار نواری بلور، برای محاسبه‌ی انرژی حاملین بار در هر تکانه خطی، مسیر حرکت نوعی حاملین بار در ولتاژهای اعمالی مختلف با تکرار گامهای متوالی بدست آمده است. در هر گام مسیر، با در نظر گرفتن احتمال رخداد انواع اندرکنش‌های حاملین بار واقع در هر نوار انرژی بلور، نوع اندرکنشی که ممکن است رخ دهد، مشخص می‌شود.

کلمات کلیدی: آشکارسازهای نیمه‌رسانا، حاملین بار، شبیه‌سازی مونت کارلو.

Investigation of transport of charge carriers in silicon based semiconductor detectors by Monte Carlo simulation method

Alavinasab Ardabili, Seyyed Mohammad Amin*, Hamdipour, Mohammad, Noori-Asl, Mahsa

University of Mohaghegh Ardabili, Faculty of Science, Department of Physics

Abstract:

In this research, the behavior of charge carriers and transport of carriers in semiconductor detectors, specifically silicon-based detectors have been investigated. By using the Monte Carlo simulation and considering the band structure of the crystal (to calculate the energy of the charge carriers in each momentum), typical path of charge carriers at different applied voltages has been obtained by repeating successive steps. At each step of the path, the type of interaction that may occur is determined by considering the probability of occurrence of various types of interactions of charge carriers in each energy band in the crystal.

Key words: Semiconductor detectors, Charge carriers, Monte Carlo simulation.



۱ - مقدمه:

آشکارسازهای نیمه‌رسانا دسته‌ای از آشکارسازهای تابشی هستند که می‌توانند برای آشکارسازی پرتوهای گاما، ایکس، ذرات آلفا و بتا مورد استفاده قرار گیرند. این نوع آشکارسازها برخلاف آشکارسازهای سوسوزن، به علت تبدیل مستقیم انرژی تابش فرودی به پالس خروجی، تفکیک انرژی بهتری را ارائه می‌دهند. در آشکارسازهای سوسوزن، پالس خروجی طی چندین مرحله (تولید نور سوسوزنی، انتقال آن به فوتوکاتد و تقویت چند مرحله‌ای در لامپ تکثیرکننده فوتونی) تولید می‌شود. هر یک از این مراحل می‌تواند باعث ایجاد خطاهایی در اندازه‌گیری انرژی تابش فرودی شده و در نتیجه، منجر به کاهش تفکیک انرژی نهایی آشکارساز شود. در حال حاضر، آشکارسازهای نیمه‌رسانای HPGe و HPSi قدرت تفکیک انرژی بالایی را ارائه می‌دهند، که البته آشکارساز HPGe به علت عدد اتمی بالاتر و کارایی بهتر متداول‌تر می‌باشد [۱]. یکی از اصلی‌ترین گام‌ها در بررسی خواص آشکارسازهای نیمه‌رسانا، تحلیل الکتروستاتیکی و تراپردی حاملین بار در این مواد است. این تحلیل‌ها به روش‌های متعددی صورت می‌گیرند. در صورت علاقه به بررسی رفتار جمعی حاملین بار می‌توان از معادلات پخش-سوق حاملین بار استفاده کرد [۲]. اما در صورتی که حرکت تک تک حاملین بار مورد نظر باشد، یک ابزار قدرتمند، استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو است. برای تحلیل حرکت حاملین بار در نیمه‌رساناها لازم است که با استفاده از مکانیک کوانتومی، خواص موجی آن‌ها در نظر گرفته شود، که خود شامل روش‌های متعددی است. تابع موج الکترون داخل بلور نیمه‌رسانا به صورت موج بلاخ است که دارای همان تناوب شبکه می‌باشد [۳]. با این حال، برای تحلیل آشکارسازهای نیمه‌رسانا می‌توان از روش نیمه کلاسیک استفاده کرد. بدین معنا که، حاملین بار را به صورت ذره در نظر گرفت، به شرطی که ساختار نواری نیمه‌رسانای مورد نظر (که با محاسبات کوانتومی بدست آمده) برای محاسبه انرژی در هر حالت تکانه و تعیین حرکت ذره به کار برده شود. در این پژوهش، برای بررسی رفتار آشکارسازهای نیمه‌رسانا، روش شبیه‌سازی مونت کارلو را در زبان ++C پیاده‌سازی نموده و با استفاده از آن برخی خواص تراپردی این سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲ - روش کار:

آشکارساز مورد بررسی در این مطالعه از نوع سیلیکونی می‌باشد. در ابتدا ساختار نواری این نیمه‌رسانا محاسبه شده و نمودار منطقه‌ی اول بریلوئن آن رسم می‌شود. سپس، از نمودارهای بدست آمده برای محاسبه‌ی دینامیک الکترون و حفره استفاده می‌شود.

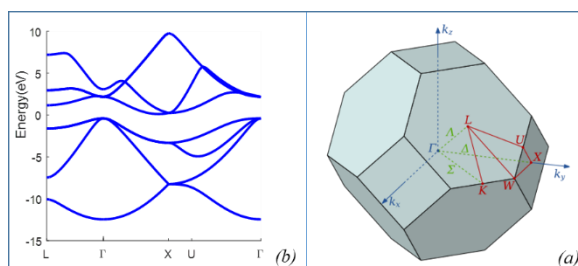
در شکل (۱) قسمت (a)، نمودار ساختار نواری سیلیکون، که به روش ابتدا به ساکن بدست آمده، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این نمودار در فضای تکانه رسم شده است. علاوه بر این، در قسمت (b) این شکل، منطقه‌ی اول بریلوئن بلور سیلیکون رسم شده است. در صورتی که انرژی برانگیختگی الکترون کم باشد، الکترون در دره‌های رسانش که واقع در کمینه‌های ساختار نواری هستند، حرکت خواهد کرد. اولین نکته‌ای که با توجه به این ساختار نواری می‌توان دریافت آن است که الکترون‌ها با اندازه تکانه‌ی خطی یکسان، که در جهات مختلف حرکت می‌کنند، دارای انرژی‌های متفاوتی هستند.



در صورتی که الکترون برانگیخته شده، در نزدیکی دره‌ی نوار رسانش قرار گیرد، می‌توان با بسط تیلور انرژی حول نقطه‌ی کمینه، جرم مؤثری برای الکترون بدست آورد، که می‌توان از آن در معادلات حرکت الکترون استفاده نمود [۳]:

$$m^* = \frac{1}{d^2 E / dk^2} \quad (1)$$

در این حالت برای یک بلور عام، جرم مؤثر تانسوری 3×3 خواهد بود، هر چند در حالت‌های متقارن، عناصر مستقل کاهش خواهند یافت. اما در صورتی که انرژی الکترون زیاد باشد، باید کل ساختار نواری در نظر گرفته شود، که حتی ممکن است منجر به جابه‌جایی الکترون بین دره‌های مختلف نوار رسانش گردد.



شکل (۱): (a) نمودار ساختار نواری سیلیکون [۴] و (b) منطقه‌ی اول بریلوئن این بلور به همراه دره‌های نوار رسانش.

اگر از واحد eV برای انرژی و جرم استفاده شود، ابتدا با رابطه‌ی زیر برآوردی از انرژی الکترون در هر گام را بدست آورده و با توجه به وابسته بودن سطح مقطع‌های مختلف به انرژی، زمان برخورد از سطح مقطع‌های محاسبه شده در انرژی برآوردی بدست آورده می‌شود:

$$E_k = E_{k_0} + V \cdot E dt + \frac{c^2 E^2}{2m} dt^2 \quad (2)$$

در رابطه بالا dt زمان برخورد است، که صرفاً با انرژی ابتدای گام محاسبه شده است. پس از محاسبه‌ی انرژی انتهای گام و محاسبه‌ی زمان برخورد با استفاده از آن، تغییر عدد موج و مکان یک الکترون در یک میدان الکتریکی داخل بلور نیمه‌رسانا در بازه‌ی dt از روابط رنگ کوتای مرتبه ۴ بدست می‌آیند، که در اینجا برای حفظ سادگی، روابط رنگ کوتای مرتبه ۲ نوشته شده‌اند:

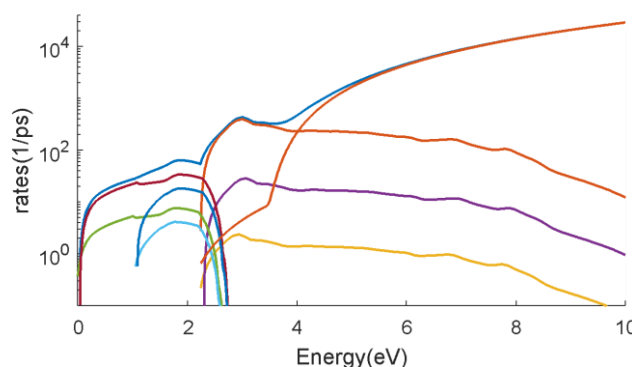
$$\vec{k} = \vec{k}_0 + c E dt \quad (3)$$

$$d\vec{r} = \left(\frac{\vec{v} + \vec{v}_0}{2} \right) dt \quad (4)$$

در انتهای هر گام، با توجه به آهنگ برخورد هر کدام از برهم‌کنش‌ها، که یک نمونه از آن برای بلور Si در شکل (۲) نشان داده شده است، نوع برهم‌کنش مشخص می‌گردد. سپس، با در نظر گرفتن پایداری تکانه‌ی خطی و پایداری انرژی، جهت بردار موج الکترون بعد از برخورد مشخص می‌شود. در شرایطی که ولتاژ اعمالی به نیمه‌رسانا زیاد باشد، تکثیر الکترونی از طریق برخورد



الکترون‌های انرژی گرفته از میدان الکتریکی با اتم‌های قرار گرفته در مسیرشان می‌تواند رخ دهد. در عمل، این اتفاق در آشکارسازهای نیمه‌رسانا از نوع بهمنی رخ می‌دهد.



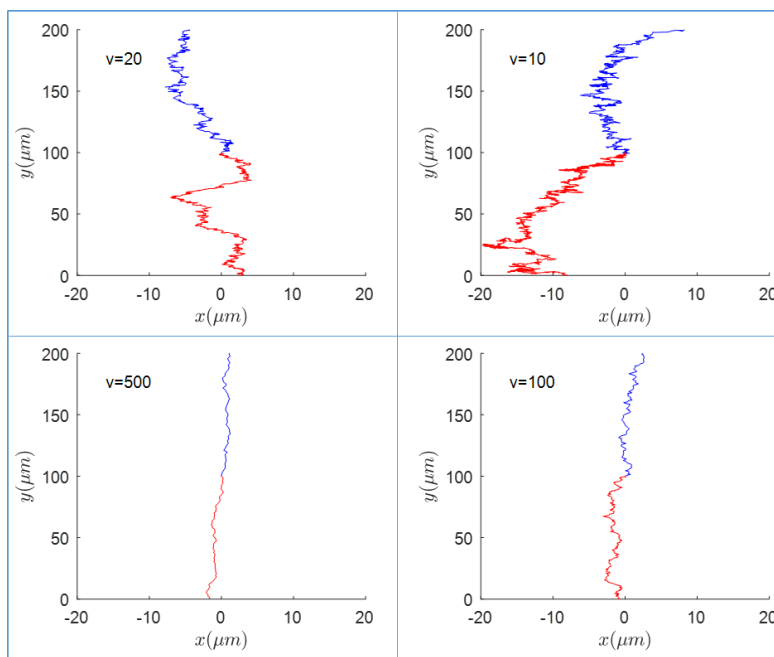
شکل (۲): نمودار آهنگ برخورد (متناسب با سطح مقطع)، مربوط به اندرکنش‌های مختلف الکترون در باند Γ ، واقع در مرکز منطقه‌ی اول بریلوئن، با شبکه‌ی سیلیکونی برحسب انرژی. بالاترین نمودار آهنگ برخورد کل، که حاصل جمع سایر نمودارها است، را نشان می‌دهد.

۳ - نتایج:

در گام اول، برای نشان دادن انواع اندرکنش‌ها، چند نمونه شبیه‌سازی انجام داده و نتایج آن‌ها را تحلیل می‌کنیم. در گام بعد، خواص تراپردی الکترون و حفره را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. برای این هدف، ابتدا یک آشکارساز سیلیکونی با ضخامت $200\mu m$ را در نظر گرفته و فرض می‌کنیم پرتو یونیزان باعث ایجاد یک تک جفت الکترون-حفره دقیقاً در مرکز این آشکارساز ($100\mu m$) شود. سپس، مسیر حرکت الکترون و حفره تولید شده را در ولتاژهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ولت مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج بدست آمده از این شبیه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. باید توجه داشت که به علت پدیده‌ی شکست دی الکتریک، نمی‌توان ولتاژ را به صورت دلخواه تا هر مقداری بالا برد. در آشکارسازهای خوب طراحی شده، ولتاژ تا حدود $1200V$ قابل افزایش می‌باشد. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که، در ولتاژهای پایین، اثر حرکت گرمایی حاملین بار بیشتر از اثر حرکت سوقی آن‌ها تحت اثر میدان الکتریکی بوده و باعث می‌شود که مسیر حاملین بار، ظاهری کاتوره‌ای داشته باشد. در حالی که در ولتاژهای بالاتر، اثر حرکت سوقی بیشتر بوده و مسیر حرکت حاملین بار تقریباً به صورت یک خط راست می‌باشد. در این شکل، مسیر آبی رنگ مربوط به حرکت الکترون و مسیر قرمز

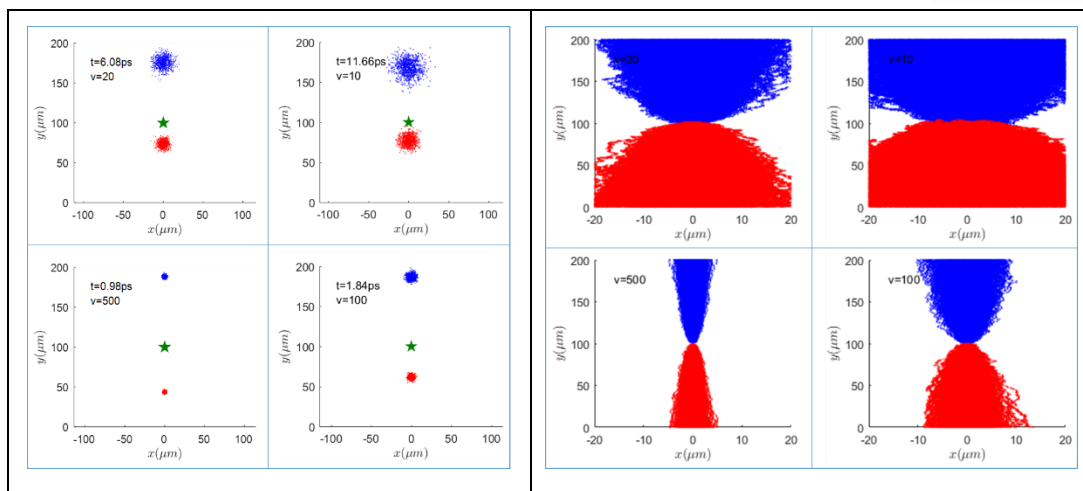


رنگ مربوط به حرکت حفره می‌باشد. این نتیجه، دلیل نیاز به استفاده از ولتاژهای به حد کافی بالا را در آشکارسازهای نیمه‌رسانا نشان می‌دهد.



شکل (۳): مسیر تک جفت الکترون- حفره تولید شده در مرکز آشکارساز سیلیکونی در ولتاژهای ۱۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ولت. مسیر آبی رنگ مربوط به الکترون و مسیر قرمز رنگ مربوط به حفره می‌باشد.

در شکل (۴-راست)، حرکت گروهی حاملین بار، با فرض این که پرتو یونیزان باعث تولید تعداد ۱۰۰۰ جفت الکترون- حفره در مرکز آشکارساز شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. حرکت این حاملین بار را تحت ولتاژهای اعمالی ۱۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ولت مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به شکل، مجموعه الکترون‌ها یا مجموعه حفره‌ها را می‌توان به صورت ابر باری در نظر گرفت که به علت پدیده‌ی پخش با حرکت رو به جلو پهن‌تر می‌شود. این پهن‌شدگی ممکن است به قدری بزرگ باشد که از منطقه‌ی حساس آشکارساز خارج شود. پهنای ابر حاملین بار در آشکارسازهای حساس به مکان، به ویژه آشکارسازهای مورد استفاده در سیستم‌های تصویربرداری پزشکی، دارای اهمیت زیادی است و یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی تفکیک فضایی این سیستم‌ها می‌باشد. از این رو، برای کاهش پهنای ابر حاملین بار معمولاً سعی می‌شود در کنار بهینه‌سازی سایر پارامترها، از ولتاژهای بالاتری نیز استفاده شود. از نمودارهای مشابه شکل (۴-راست)، که در محدوده‌ی ولتاژی وسیع‌تری بدست آمده‌اند، می‌توان برای بدست آوردن مقدار بهینه‌ی ولتاژ جهت دستیابی به مقدار مورد نظر تفکیک فضایی استفاده نمود.



شکل (۴): (راست) مسیر حرکت ۱۰۰۰ جفت الکترون - حفره تولید شده در مرکز آشکارساز سیلیکونی در ولتاژهای ۱۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ولت. (چپ) تصویر مکان ابر بار مربوط به الکترون‌ها (رنگ آبی) و حفره‌ها (رنگ قرمز) در ولتاژهای ۱۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ولت در مدت زمان لازم برای جمع‌آوری الکترون‌ها.

بزرگی ولتاژ اعمال شده بر آشکارسازهای نیمه‌رسانا، علاوه بر پهنای ابر الکترونی، بر مدت زمان جمع‌آوری حاملین بار و زمان شکل‌گیری پالس خروجی آشکارساز نیز تأثیر می‌گذارد. این موضوع در شکل (۴-چپ)، که در آن ابر حاملین بار در یک لحظه‌ی خاص نشان داده شده است، واضح می‌باشد. در این شکل، محل تولید جفت الکترون - حفره‌ها با علامت ستاره‌ی سبز رنگ در مرکز آشکارساز در مکان (۱۰۰ و ۰) مشخص شده است. با توجه به شکل، به ابر حاملین بار در هر ولتاژ خاص اجازه داده می‌شود تا طی مدت زمان مشخصی، که معادل با زمان لازم برای جمع‌آوری الکترون‌ها در ولتاژ مورد نظر است، به سمت الکترودهای جمع‌آوری حرکت کنند. پس از پایان بازه‌ی زمانی مورد نظر، میزان مسافت طی شده توسط حفره‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در ولتاژهای پایین، زمان جمع‌آوری حاملین بار طولانی‌تر بوده، که منجر به محدود شدن کاربرد آشکارساز به آهنگ‌های شمارش پایین می‌شود. بنابراین، برای امکان شمارش آهنگ‌های بالاتر باید ولتاژ اعمالی افزایش یابد. علاوه بر این، در ولتاژهای پایین، در مدت زمان جمع‌آوری الکترون‌ها، حفره‌ها تنها کسر کوچکی از مسیر حرکت خود را طی می‌کنند. این بدین معنا است که پالس خروجی آشکارساز شامل دو بخش، یک بخش سریع مربوط به رانش سریع الکترون‌ها و یک بخش کند مربوط به رانش کندتر حفره‌ها، می‌باشد. با این حال، با افزایش ولتاژ اعمالی، طول مسیر طی شده توسط حفره‌ها در این مدت زمان افزایش یافته و باعث یکنواختی بیشتر شکل پالس خروجی آشکارساز می‌شود.

۴ - بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه، حرکت فردی حاملین بار، که نشان‌دهنده‌ی مسیر و میزان افت و خیز آن‌ها است، و همچنین، حرکت گروهی آن‌ها، که نشانگر پخش حاملین بار در امتداد مسیر حرکت آن‌ها است، مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر، تصویر لحظه‌ای ابر حاملین بار در ولتاژهای مختلف، که اطلاعات مفیدی را در خصوص زمان جمع‌آوری حاملین بار و نیز



تحرك پذیری آن‌ها بدست می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که، افزایش ولتاژ اعمالی منجر به کاهش پهنای ابر حاملین بار و در نتیجه، بهتر شدن قدرت تفکیک فضایی در آشکارسازهای حساس به مکان شده و علاوه بر این، کاهش مدت زمان جمع‌آوری حاملین بار و در نتیجه، امکان استفاده از آشکارساز در آهنگ‌های شمارش بالاتر را فراهم می‌کند.

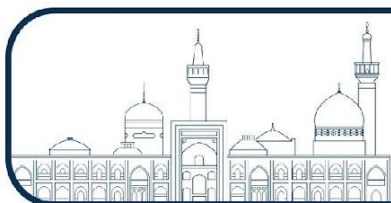
۵ - مراجع:

[۱] نول گلن ف. علیرضا صدر ممتاز (مترجم)، مهسا نوری اصل (مترجم) اندازه گیری و آشکارسازی تابش‌ها. انتشارات دانشگاه گیلان (۱۳۹۲).

[۲] زی اس. م. ، غلامحسین سدیرعابدی (مترجم)، فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمه‌رسانا، دانشگاه صنعتی سجاد (۱۳۹۴).

[۳] اشکرافت نیل و مرمین دیوید، محمدرضا خانلری (مترجم) و اعظم پورقازی (مترجم)، فیزیک ماده چگال. انتشارات دانش نگار (۱۴۰۰).

[۴] https://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_zone



مکان‌یابی چشمه با استفاده از تحلیل طیف انرژی در آشکارساز سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای (کد مقاله: ۱۳۹۳)

جواد کوچک‌پور^{۱*}، سید ابوالفضل حسینی^۱، علی طاهری^۲، مجتبی عسکری^۲

۱. دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای صندوق پستی: ۸۶۳۹-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

چکیده:

امروزه آشکارسازهای حساس به مکان کاربردهای گسترده‌ای در پزشکی و صنعت دارند. در این تحقیق، عملکرد یک آشکارساز سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر برای مکان‌یابی پرتوها با استفاده از تحلیل طیف انرژی چشمه ^{137}Cs در فواصل مختلف از PMT مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که FWHM به موقعیت چشمه وابسته است؛ به‌گونه‌ای که با نزدیک شدن چشمه به PMT، پهنای لبه کامپتون افزایش و با دور شدن آن کاهش می‌یابد. این تغییرات ناشی از افت انرژی فوتون‌های نوری به دلیل پراکندگی است. تحلیل‌ها نشان داد که این ویژگی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای مکان‌یابی پرتوها در آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آشکارساز حساس به مکان، آشکارساز سوسوزن پلاستیک بزرگ، طیف انرژی، *Photomultiplier Tube* (PMT)، فرآیند نوری سوسوزنی

Source Positioning Using Energy Spectrum Analysis in Plastic Plate Scintillator Detector

Kochakpour Javad^{۱, ۲*}, Hosseini Seyed Abolfazl^۱, Taheri Ali^۲, Askari Mojtaba^۲

۱. Sharif University of Technology, Faculty of Energy Engineering, Department of Nuclear Engineering, P.O. Box: ۸۶۳۹-۱۱۳۶۵, Tehran, Iran.

۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Applications Research School, P.O. Box: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹ Tehran, Iran.

Abstract:

Position-sensitive detectors have widespread applications in medicine and industry. In this study, the performance of a plastic scintillator detector with dimensions of $50 \times 50 \times 50$ cm was investigated for photon localization using energy spectrum analysis of a ^{137}Cs source at various distances from the PMT. The results showed that FWHM is dependent on the source position; specifically, as the source approaches the PMT, the Compton edge broadens, whereas it narrows as the source moves away. These variations are attributed to the energy loss of optical photons due to scattering. The analysis indicates that this characteristic can be utilized as a criterion for photon localization in large plastic scintillator detectors.

Key words: Position sensitive detector, Large plastic scintillator detector, Energy spectrum, Photomultiplier Tube (PMT), Scintillation light process



۱ - مقدمه:

در عملکرد مکانی یک آشکارساز پرتویی، با استفاده از روش‌های مختلف موقعیت انتشار پرتو و یا مکان اندرکنش پرتو درون آشکارساز تخمین زده خواهد شد و عملکرد آشکارساز در تخمین این پارامتر با قدرت تفکیک مکانی آشکارساز معرفی خواهد شد. آشکارساز حساس به مکان (Position sensitive detector (PSD)) یک سنسور موقعیت پرتویی است که می‌تواند موقعیت یک پرتو را در یک، دو یا سه بعد روی سطح آشکارساز اندازه‌گیری کند. در ادامه انواع آشکارسازهای حساس به مکان پرتویی بررسی شده است.

آشکارسازهای حساس به مکان پرتو کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های تحقیقاتی پزشکی، نجومی، صنعتی و غیره دارد [۱، ۲]. توسعه این آشکارسازها بر اساس ویژگی حساس به مکان به دلیل فرآیند ساخت و ساختار پیچیده آسان نیست. در آشکارسازهای سوسوزن نیز با استفاده از آشکارسازهای پیکسلی و آرایه‌ای می‌توان نوعی از آشکارساز حساس به مکان را ایجاد کرد که در این نوع از آشکارسازها با توجه به تعداد زیاد پیکسل‌ها و یا آرایه‌ای از آشکارسازها که در هر کدام از آن‌ها نیاز به یک سیستم مجزا از PMT و یا SiPM بوده، سیستم آشکارسازی قادر به تخمین موقعیت و اندرکنش پرتو خواهند بود.

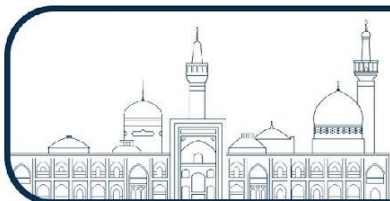
یکی از پرکاربردترین آشکارسازهای سوسوزنی، آشکارساز سوسوزن پلاستیک است که به دلیل ویژگی‌های متمایزی از قبیل هزینه پایین، بازده نوری بالا، زمان پاسخ سریع (نانو ثانیه)، قابلیت ماشین کاری (قابلیت تولید در اشکال مختلف و حجم‌های بزرگ) و خصوصیات مقاومتی بالا در برابر شرایط محیطی مختلف کاربردهای فراوانی به عنوان یک آشکارساز حساس به مکان دارند [۳]. آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی بزرگ نیز کاربردهای مختلفی به عنوان آشکارساز حساس به مکان در زمینه تصویربرداری‌های کیهانی، توموگرافی صنعتی، پایشگرهای درگاهی و غیره دارند.

یکی از روش‌های مکان‌یابی پرتوها، تحلیل طیف انرژی و بررسی تغییرات آن در پاسخ به موقعیت منبع تابش است. در آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی، تابش ورودی باعث تحریک مولکول‌های سوسوزن شده و منجر به تولید فوتون‌های نوری می‌شود که توسط PMT دریافت و پردازش می‌شوند. در این میان، توزیع انرژی ثبت‌شده وابسته به موقعیت منبع تابش است، به‌ویژه در آشکارسازهای بزرگ که تغییر موقعیت چشمه می‌تواند تأثیر محسوسی بر طیف انرژی داشته باشد [۴، ۵].

در این تحقیق، یک آشکارساز سوسوزن پلاستیکی از جنس پلی‌استایرن با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته است. طیف انرژی حاصل از چشمه ^{137}Cs در فواصل مختلف از PMT ثبت شده و تغییرات طیف کامپتون در نقاط مختلف آشکارساز بررسی شده است. هدف از این پژوهش، بررسی قابلیت این آشکارساز در مکان‌یابی پرتوها با استفاده از تحلیل طیف انرژی و معرفی یک روش ساده و مؤثر برای آشکارسازی حساس به مکان با ابعاد بزرگ است.

۲ - روش کار:

در آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک، به دلیل عدد اتمی پایین ماده، احتمال برهم‌کنش فوتوالکتریک بسیار پایین است و بیشتر فوتون‌های گاما با اثر پراکندگی کامپتون در آشکارساز برهم‌کنش می‌کنند. در نتیجه، طیف انرژی ثبت‌شده فاقد پیک



فوتوالکتریک (فوتوپیک^{۱۰۹}) بوده و عمدتاً شامل طیف پراکندگی کامپتون است. انرژی پراکندگی کامپتون از رابطه (۱) تبعیت می‌کند [۶]:

$$(1) \quad E'_\gamma = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

که در آن E'_γ انرژی فوتون پراکنده‌شده، E انرژی اولیه فوتون، m_e جرم سکون الکترون (0.511 MeV)، c سرعت نور و θ زاویه پراکندگی است. لبه کامپتون که نشان‌دهنده بیشینه انرژی فوتون پراکنده شده ($\theta = \pi$) است، برای چشمه Cs^{137} با انرژی 661.657 keV برابر با انرژی 477.33 keV است. بنابراین، در طیف ثبت‌شده در آشکارساز، انتظار است که لبه کامپتون در انرژی 477.33 keV ظاهر شود. با این حال، در یک آشکارساز با ابعاد بالا، مسیرهای مختلفی برای پراکندگی فوتون‌ها وجود دارد که می‌تواند بر روی طیف انرژی تأثیر بگذارد. در چنین آشکارسازهای بزرگی، پراکندگی‌های چندگانه و تغییر در مسیرهای نوری منجر به گسترش و تغییر موقعیت لبه کامپتون در طیف ثبت‌شده می‌شود. علاوه بر این، وابستگی طیف انرژی به مکان برخورد فوتون‌ها به این معناست که می‌توان از این تغییرات برای مکان‌یابی چشمه پرتو استفاده کرد. در نتیجه، تغییرات لبه کامپتون و شکل کلی طیف انرژی می‌تواند به‌عنوان یک ویژگی کلیدی در توسعه آشکارسازهای حساس به مکان مورد استفاده قرار گیرد.

برای بررسی این موضوع، در این مطالعه طیف انرژی آشکارساز سوسوزن پلاستیک با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر از جنس پلی‌استایرن و یک PMT مدل CR 169 BEIJING Hamamatsu China استفاده شد. برای بهبود جمع‌آوری نور، سطح آشکارساز با یک بازتابنده آلومینیومی-مایلار^{۱۱۰} پوشانده شد که تنها در ناحیه اتصال PMT از آن صرف‌نظر شد تا اتصال به درستی صورت گیرد. علاوه بر این، کل صفحات آشکارساز با یک کاور مشکی رنگ پوشانده شد تا از ورود نور محیطی به درون آشکارساز به‌طور قابل توجهی جلوگیری شود. همچنین در ادامه PMT به‌طور دقیق به یکی از صفحات جانبی آشکارساز متصل شد.

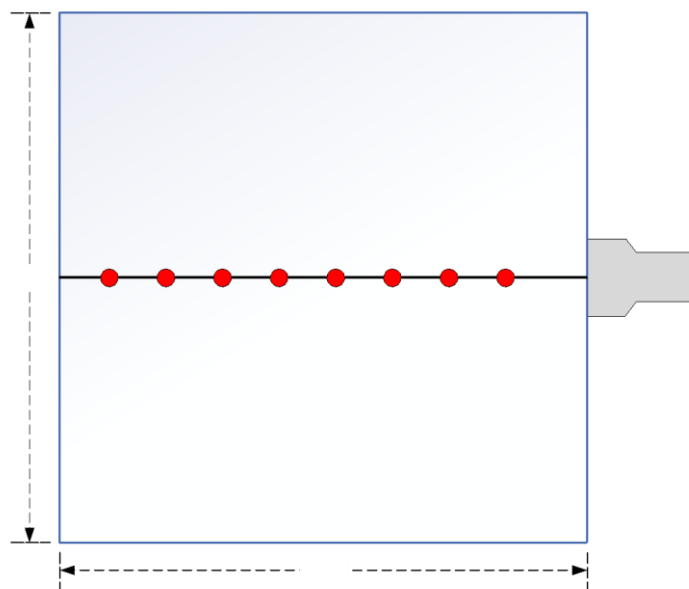
سیستم الکترونیکی مورد استفاده در این مطالعه شامل اجزای مختلفی است که برای تقویت و پردازش سیگنال‌های دریافتی از PMT به‌کار گرفته شد. این اجزا شامل ماژول ولتاژ بالا مدل CC228 01Y BEIJING Hamamatsu China برای تأمین ولتاژ مناسب برای PMT، پیش‌تقویت‌کننده مدل IAP ۳۰۰۱ برای تطبیق امپدانس، NIM Bin مدل A ORTEC ۴۰۰۱ به‌منظور یکپارچه‌سازی و تأمین توان ماژول‌ها، تقویت‌کننده مدل ORTEC ۵۷۲ برای تقویت سیگنال‌ها، مبدل آنالوگ به دیجیتال مدل IAP ۴۰۰۰ برای تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال و تحلیلگر چند پارامتری مدل IAP ۴۳۰۰ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها است. خروجی این تحلیلگر از طریق پورت USB به یک کامپیوتر متصل شد تا داده‌ها ثبت و ذخیره شوند. از چشمه گاما Cs^{137} با پرتوایی ۷ میکروکوری به‌منظور ثبت طیف‌های انرژی استفاده شد. برای بررسی تأثیر موقعیت چشمه (SP) بر روی طیف انرژی آشکارساز پیشنهادی، طیف‌ها در نقاط مختلف آشکارساز از PMT مطابق شکل ۱ ثبت شدند. این

^{۱۰۹} Photopeak

^{۱۱۰} Al-Mylar



اندازه‌گیری‌ها در مدت ۳۰۰ ثانیه برای هر موقعیت اندازه‌گیری شد تا از دقت بالا در ثبت سیگنال‌ها اطمینان حاصل شود. به‌منظور کاهش پرتوهای محیطی، قبل از اندازه‌گیری طیف چشمه، طیف پس‌زمینه در همان شرایط بدون تابش چشمه ثبت گردید و در نهایت از طیف چشمه کسر گردید. در شکل ۲ چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی به صورت نمونه‌ای ارائه شده است.



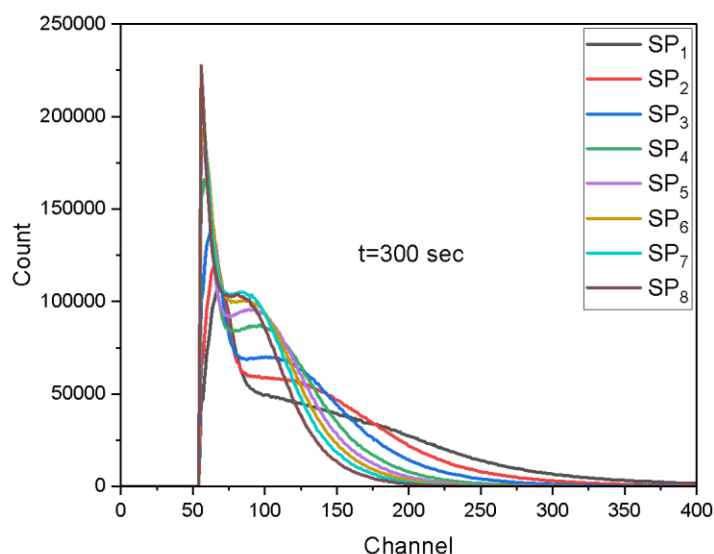
شکل (۱) نمایش موقعیت‌های مختلف چشمه (SP) نسبت به PMT در صفحه آشکارساز پیشنهادی



شکل (۲) چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی راه‌اندازی شده

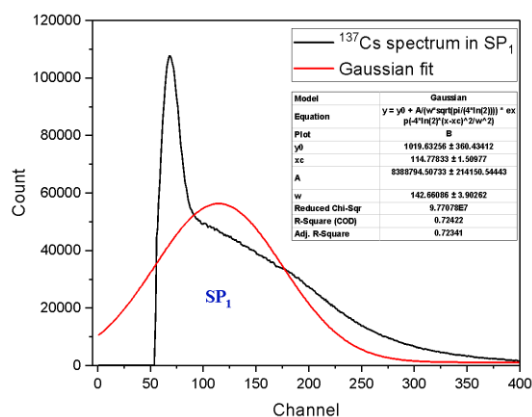
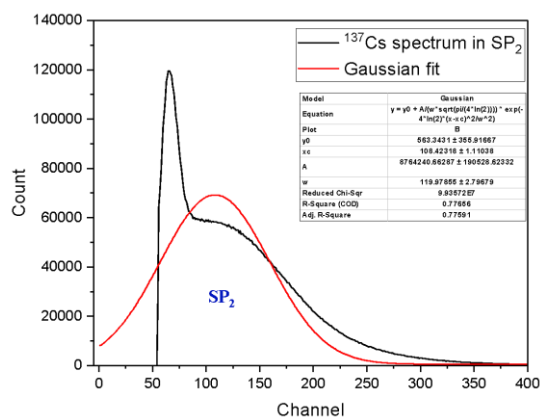
۳ - نتایج:

در این بخش، نتایج حاصل از اندازه‌گیری طیف انرژی چشمه ^{137}Cs در آشکارساز سوسوزن پلاستیک در موقعیت‌های مختلف چشمه بررسی شده است. با جابه‌جایی چشمه در نقاط مختلف آشکارساز، طیف‌های انرژی ثبت‌شده در PMT تغییرات قابل توجهی را به‌طور خاص در لبه کامپتون مطابق شکل ۳ نشان دادند.

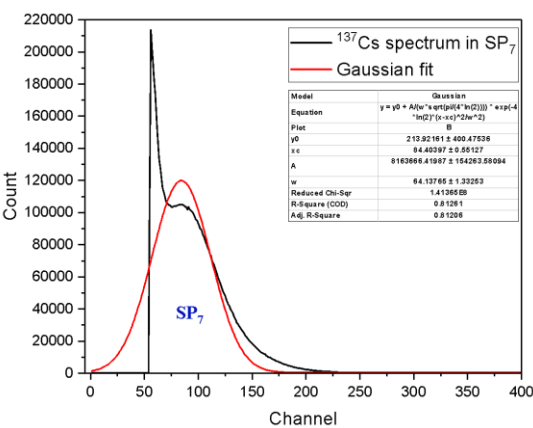
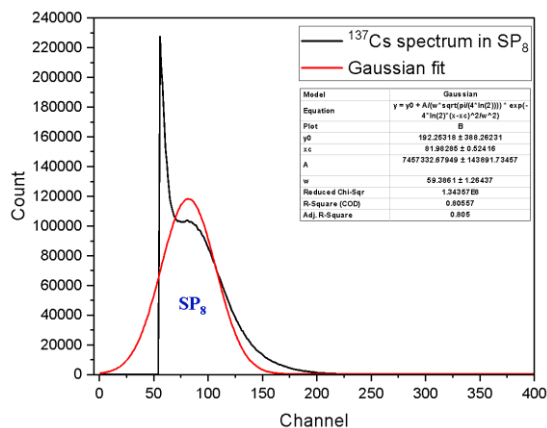
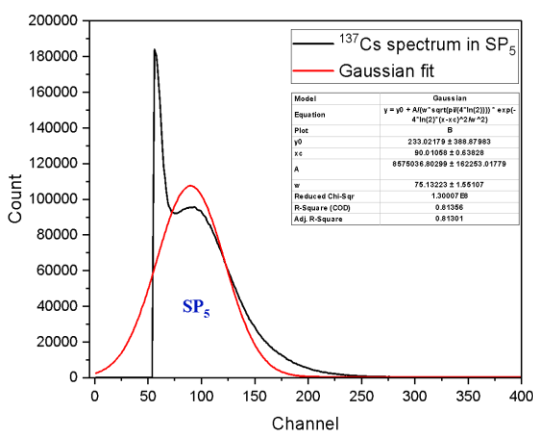
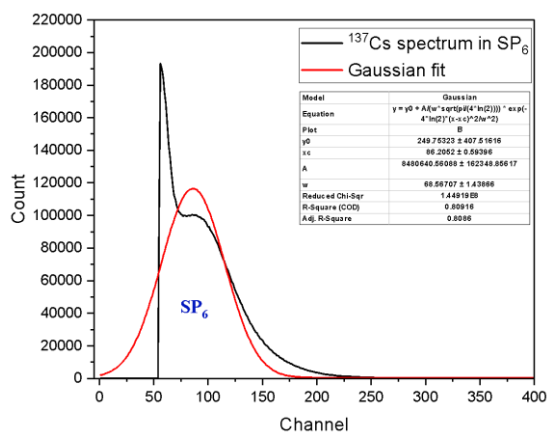
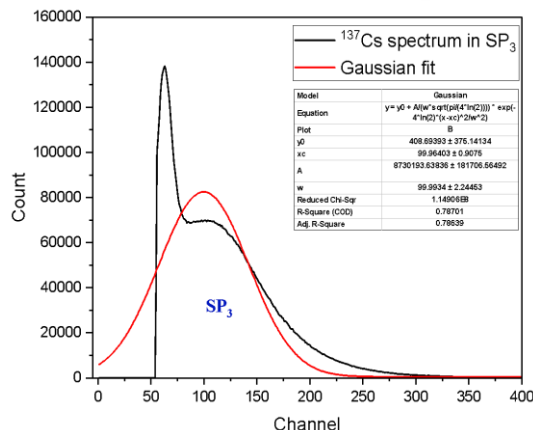
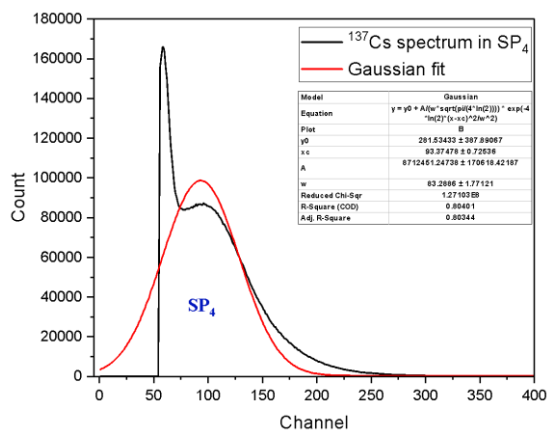


شکل (۳) تغییرات طیف انرژی چشمه ^{137}Cs به ازای مکان‌های مختلف از چشمه

برای تحلیل دقیق‌تر، فیت گوسی بر روی لبه کامپتون انجام شد. فیت گوسی به‌طور معمول برای شبیه‌سازی توزیع شدت سیگنال در این ناحیه از طیف انرژی به کار می‌رود. در این مطالعه، از ویژگی تمام پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM^{111}) برای ارزیابی دقت و وضوح طیف انرژی مطابق شکل ۴ استفاده شده است.



¹¹¹ Full width at half maximum value



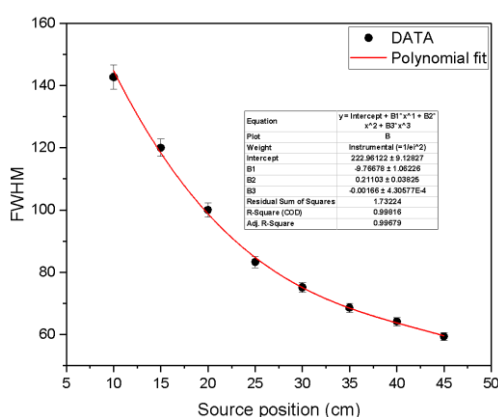
به ازای مکان‌های مختلف از چشمه ^{137}Cs شکل (۴) اعمال فیت گوسی بر روی لبه کامپتون طیف انرژی چشمه ^{137}Cs

نتایج نشان داد که تغییرات در FWHM در نقاط مختلف آشکارساز به طور معناداری به موقعیت چشمه وابسته است. به طور خاص، هرچه چشمه به PMT نزدیک‌تر شود، پهنای لبه کامپتون تغییر کرده و FWHM افزایش می‌یابد و بالعکس با افزایش فاصله چشمه از PMT مقدار FWHM کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان بر اساس رفتار انتشار نور در داخل آشکارساز توجیه کرد. زمانی که چشمه به PMT نزدیک‌تر باشد، اکثر فوتون‌های نوری تولیدشده در اثر فرآیند سوسوزنی، مسیر کوتاه‌تری را طی کرده و با احتمال بیشتری به PMT می‌رسند. در این شرایط، جذب فوتون‌های نوری توسط PMT کارآمدتر است و در

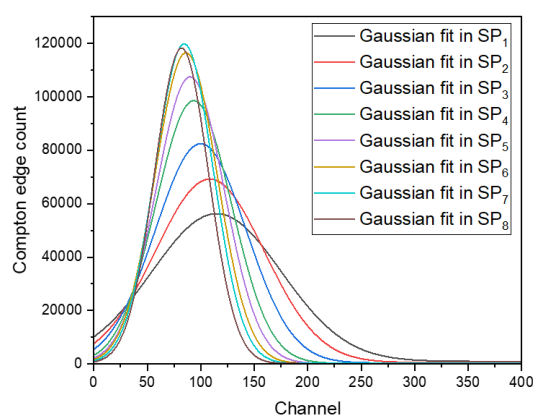


نتیجه، طیف انرژی با پهنای گسترده‌تر (FWHM بزرگ‌تر) ثبت می‌شود. در مقابل، زمانی که چشمه از PMT فاصله می‌گیرد، فوتون‌های نوری قبل از رسیدن به PMT در داخل آشکارساز دچار پراکندگی و بازتاب‌های متعدد نور سوسوزنی درون آشکارساز به علت وجود بازتابنده می‌شوند. این پراکندگی‌ها باعث می‌شوند که بخشی از فوتون‌های اولیه انرژی خود را از دست بدهند یا مسیرشان تغییر کند، که منجر به کاهش کارایی انتقال نور و در نهایت کاهش شدت سیگنال می‌شود. در نتیجه، طیف انرژی ثبت‌شده جمع‌تر شده و مقدار FWHM کاهش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه ابعاد بزرگ آشکارساز بر روی رفتار طیف انرژی است و بر نقش پراکندگی نور در مکان‌یابی چشمه تأکید دارد.

به‌طور قطع، ابعاد بزرگ آشکارساز و نوع آن در این مطالعه که یک آشکارساز سوسوزن پلاستیکی است، عوامل مهمی هستند که قدرت تفکیک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به‌ویژه در آشکارسازهای با ابعاد بزرگ، پراکندگی و بازتاب‌های نور سوسوزن باعث می‌شود که طیف ثبت‌شده ویژگی‌های گوسی را از دست بدهد و این امر می‌تواند به دقت پایین‌تر فیت گوسی منجر شود. علاوه بر این، نوع سوسوزن پلاستیکی آشکارساز نیز به‌خودی‌خود بر قدرت تفکیک تأثیر می‌گذارد، چرا که آشکارسازهای سوسوزنی از جنس پلاستیک معمولاً دقت تفکیک بالایی ندارند. با این حال، در این مطالعه با توجه به این که تغییرات معناداری در طیف لبه کامپتون در نقاط مختلف آشکارساز مشاهده شد، استفاده از فیت گوسی برای تحلیل محدوده لبه کامپتون انتخاب گردید. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و فیت‌های مختلفی که بر روی طیف‌های ثبت‌شده اعمال گردید، فیت گوسی ارائه‌شده به‌عنوان بهترین فیت در نظر گرفته شد. نتایج فیت گوسی نشان می‌دهند که تغییرات در قدرت تفکیک و FWHM با جابه‌جایی چشمه پرتوزا به‌طور معناداری تغییر می‌کنند، که این تغییرات در تحلیل طیف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فیت‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB در محدوده لبه کامپتون به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین فیت‌ها برای این نوع طیف‌ها به‌ویژه با توجه به ابعاد آشکارساز و نوع آن در نظر گرفته شدند. با توجه به دلایل اشاره‌شده، این فیت‌ها نتایج قابل‌قبولی را در زمینه تحلیل تغییرات FWHM ارائه می‌دهند. شکل ۵ نمودار تغییرات فیت گوسی بر حسب شمارش لبه کامپتون در هر مکان از چشمه و شکل ۶ نیز تغییرات FWHM بر حسب موقعیت چشمه را نشان می‌دهد.



شکل (۶) تغییرات FWHM بر حسب موقعیت چشمه



شکل (۵) تغییرات فیت گوسین بر حسب شمارش لبه کامپتون در هر مکان از چشمه

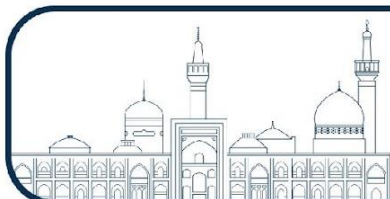


۴ - بحث و نتیجه گیری:

در این مطالعه، یک آشکارساز سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای برای مکان‌یابی پرتوها بر اساس تحلیل طیف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. طیف‌های انرژی در نقاط مختلف آشکارساز ثبت و تحلیل شدند و تغییرات لبه کامپتون و FWHM به عنوان معیاری برای حساسیت مکان‌یابی آشکارساز مورد ارزیابی قرار گرفتند. این مطالعه نشان داد که FWHM می‌تواند به عنوان یک معیار کارآمد برای مکان‌یابی پرتوها در آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات FWHM در نقاط مختلف آشکارساز، که ناشی از پراکندگی کامپتون و تأثیرات موقعیت چشمه بر روی انتشار نور و ثبت سیگنال توسط PMT است، نشان‌دهنده حساسیت مکانی آشکارساز است. نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که آشکارساز سوسوزن پلاستیک صفحه‌ای پیشنهادی قادر به مکان‌یابی پرتوها بر اساس تحلیل طیف انرژی است. وابستگی مستقیم تغییرات FWHM به موقعیت چشمه نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان محل تابش چشمه را با دقت بالا تعیین کرد.

۵ - مراجع:

- [۱] T. Gys, Status and perspectives of vacuum-based photon detectors for single photon detection, Nucl. Instr. Meth. A ۵۹۵ (۲۰۰۸) ۱۳۶.
- [۲] T. Iijima, Status and perspectives of vacuum-based photon detectors, Nucl. Instr. Meth. A ۶۳۹ (۲۰۱۱).
- [۳] S.W. Moser, W.F. Harder, C.R. Hurlbut, M.R. Kusner, "Principles and Practice of Plastic, Radiation Physics and Chemistry, ۱۹۹۳.
- [۴] Javad Kochakpour, Seyed Abolfazl Hosseini, Ali Taheri, Mojtaba Askari, "Developing a ^{238}U position-sensitive detector utilizing the large plate plastic scintillator," Nuclear Engineering and Technology, ۲۰۲۰.
- [۵] [جواد کوچک پور، سیدابوالفضل حسینی، علی طاهری، مجتبی عسکری، "بهینه‌سازی و ارزیابی ها در آشکارساز سوسوزن پلاستیکی بزرگ به منظور استفاده در آشکارسازهای حساس PMT چپینش ۴،" مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، زمستان ۱۴۰۳. Geant به مکان با استفاده از
- [۶] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Fourth Edition, ۲۰۱۰.



مقایسه تجربی چهار نمونه پلی اتیلن بور دار جهت استفاده در حفاظ سازی PGNA (کد مقاله :

(۱۴۱۰)

محمدی، فاطمه*؛ فیروز آبادی، محمد مهدی؛ بیات، اسمعیل
دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

در این مقاله به بررسی تجربی و مقایسه پارامترهای حفاظ‌های پلی‌اتیلن بور دار با درصد‌های مختلف بور پرداخته شده است. بدین منظور شار نوترون گرمایی، شدت شار نوترون سریع و طیف گامای آنی انواع حفاظ مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه حفاظ‌های بررسی شده شامل: ترکیب پلی‌اتیلن با ۱ درصد بور، پلی‌اتیلن با ۵ درصد بور و پلی‌اتیلن با ۳۰ درصد بور ساخت شرکت شیلد-ورکس و پلی‌اتیلن با ۵ درصد بور ساخت IAP بوده است. نتایج نشان داد که افزایش درصد بور در نمونه منجر به افزایش جذب نوترون گرمایی می‌شود، اما توان کند کنندگی نوترون تغییر چندانی ندارد. همچنین با استفاده از قله 478 keV گامای آنی ناشی از جذب نوترون توسط بور می‌توان بطور نسبی، درصد بور نمونه را تعیین نمود.

کلمات کلیدی: نوترون کند، پلی‌اتیلن، فعال‌سازی نوترونی PGNA، جداسازی نوترون-گاما

Experimental comparison of four boron-containing polyethylene samples for use in PGNA shielding

Mohammadi, Fatemeh*; Firoozabadi, Mohammadmehdi; Bayat, Esmail
Department of Science, University of Birjand, Birjand

Abstract:

This paper presents an experimental study and comparison of the parameters of boron-containing polyethylene shields with different percentages of boron. For this purpose, the thermal neutron flux, fast neutron flux intensity, and instantaneous gamma spectrum of the shield types were tested. The shield samples studied included: polyethylene with 1% boron, polyethylene with 5% boron polyethylene with 30% boron manufactured by Shield Works, and polyethylene with 5% boron manufactured by IAP. The results showed that increasing the percentage of boron in the sample leads to an increase in thermal neutron absorption, but the neutron slowing power does not change much. Also, the percentage of boron in the sample can be relatively determined using the peak of 478 keV instantaneous gamma caused by neutron absorption by boron.

Key words: Thermal neutron, Polyethylene, Neutron Activation Analysis, PGNA, Neutron-gamma Separation



۱-مقدمه

آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی NAA^{112} روشی قدرتمند در تحلیل انواع نمونه به صورت کمی و کیفی می‌باشد. NAA نوعی اندرکنش هسته‌ای است که در آن هسته هدف بعد از گیراندازی نوترون اقدام به گسیل تابش گاما می‌نماید. فعال‌سازی نوترونی با توجه به زمان اندازه‌گیری گامای فعال‌سازی، عموماً به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌گردد: $PGNAA^{113}$ که در آن اندازه‌گیری در زمان پرتودهی نمونه بوده و لذا سیستم طیف‌نگاری گاما در محل پرتودهی نوترونی می‌باشد و $DGNAA^{114}$ که در آن اندازه‌گیری تابش گاما بعد از واپاشی پرتوزا در زمانی بعد از پرتودهی صورت می‌گیرد و لذا طیف‌نگاری در محلی دور از محل پرتودهی نوترونی قابل انجام است [۱،۲]. استفاده از چشمه‌های نوترون رادیوایزوتوپی همچون $Am-Be$ و یا مولدها در $PGNAA$ مستلزم طراحی حفاظ مناسب اطراف چشمه با هدف ایجاد یک باریکه تقریباً تک راستا می‌باشد. حفاظ طراحی شده باید به گونه‌ای باشد که بتواند؛ میزان دز پرتوی کاربر را کم کند، گامای ناشی بیرون حفاظ را جهت افزایش دقت و سرعت تحلیل به حداقل ممکن برساند، و آسیب ناشی از تابش نوترون بر آشکارسازهای گامای مورد استفاده را تا حد امکان کاهش دهد [۳]. در این زمینه استفاده از مواد هیدروژن دار مثل آب، پارافین، پلی‌اتیلن که حاوی مقادیری از ترکیبات افزودنی بوردار نظیر اکسید بور B_2O_3 ، اسید بوریک H_3BO_3 یا کاربید بور B_4C می‌باشد، به دلیل سطح مقطع نسبتاً بالای جذب نوترون حرارتی مربوط به ^{10}B امری متداول می‌باشد. همچنین پایین بودن انرژی گامای آبی گسیلی از جذب نوترون حرارتی در ^{10}B باعث می‌شود با ضخامت کمتری از حفاظ‌هایی مثل بتون یا سرب بتوان گاما‌های مزاحم بیرون حفاظ هیدروژن دار را حذف نمود [۴].

به منظور آماده سازی چیدمان $PGNAA$ ، از شرکت شیلد ورکس^{۱۱۵} سه نوع حفاظ پلی‌اتیلن بوردار با درصد‌های بور ۱٪، ۵٪ و ۳۰٪ خریداری شد. این حفاظ، پایه پلیمری $PE-Wax$ داشته و ترکیب بور آن از نوع B_2O_3 است. هم‌زمان از یک شرکت داخلی IAP^{116} نیز نمونه‌ای از پلی‌اتیلن بور دار با پایه پلیمری $HDPE^{117}$ با ترکیب بور B_4C خریداری گردید. هدف این تحقیق، بررسی کیفیت عملکردی این حفاظ‌های ترکیبی می‌باشد.

۲-مواد و روش‌ها

آزمایش‌های صورت گرفته شامل بررسی جذب نوترون گرمایی، کندکنندگی نوترون سریع و گامای آبی می‌باشد. نمونه‌های ترکیبات پلی‌اتیلن بوردار در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌های شیلد ورکس به شکل صفحه دایره‌ای با قطر ۱۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲.۵ سانتی‌متر و نمونه AP به ابعاد $20 \times 20 \times 2.5$ سانتی‌متر خریداری شدند. همچنین مقایسه، کادمیم با ضخامت ۱ mm و نیز پلی‌اتیلن خالص با ضخامت ۲.۵ سانتی‌متر و ابعاد 10×10 سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.

¹¹² Neutron Activation Analysis

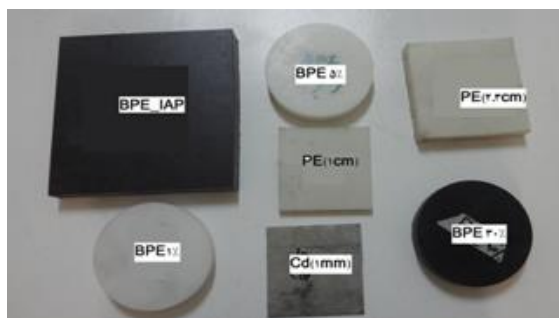
¹¹³ Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

¹¹⁴ Delay Gamma Neutron Activation Analysis

¹¹⁵ Shieldwerx

¹¹⁶ Institute of Applied Physics (Rsdco.ir)

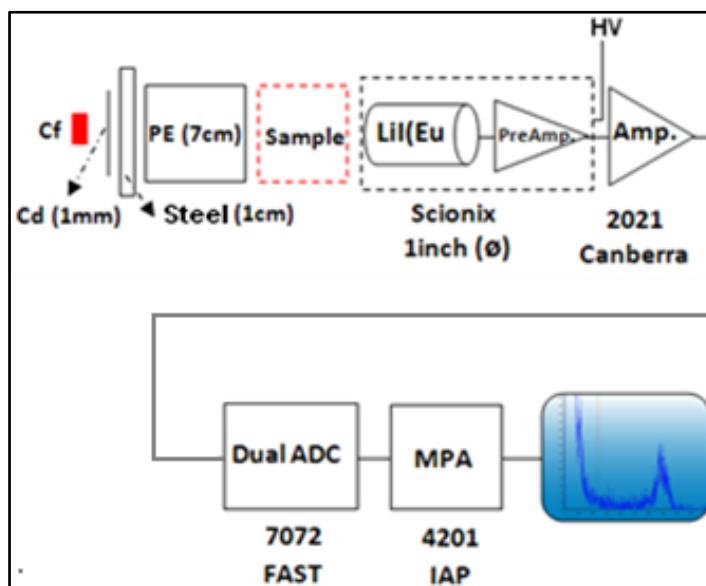
¹¹⁷ High-Density Polyethylene



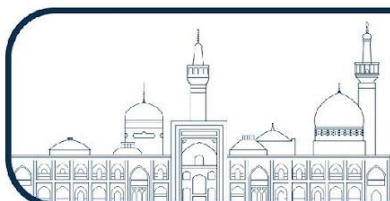
شکل (۱) نمونه های پلی اتیلن، ترکیبات حفاظ پلی اتیلن بوردار و ورق کادمیم

۱-۲- بررسی جذب نوترون گرمایی

جهت بررسی وضعیت جذب نوترون گرمایی در حفاظ‌های مختلف نوترونی طبق شکل (۲) نمونه ها در مقابل چشمه نوترون ^{252}Cf قرار داده شد، ورقه کادمیوم به ضخامت ۱mm جهت جذب نوترون حرارتی چشمه، ورقه سرب به ضخامت ۵ mm جهت جذب پرتوهای گاما ناشی از چشمه و گامای ثانویه ۵۵۸ keV ناشی از جذب نوترون حرارتی توسط کادمیم قرار داده شد. یک قطعه با ضخامت ۷ cm از پلی اتیلن، نوترون های چشمه را کند نموده و این ضخامت، حد اشباع کندسازی است و در ضخامت بیشتر، تعداد نوترون گرمایی کاهش می یابد. نمونه ها مابین این قطعه پلی اتیلنی و آشکارساز قرار می گیرند. در نهایت با استفاده از آشکارساز LiI(Eu) با کریستال به قطر ۲۵ میلی متر و ارتفاع ۶ میلی متر ساخت شرکت Scionix، پالس نمونه‌ها ثبت شد، که جزئیات در جدول (۱) آورده شده است [۵].



شکل (۲) چیدمان آزمایش بررسی جذب نوترون گرمایی در حفاظ های ترکیبی پلی اتیلن با درصد متفاوت بور

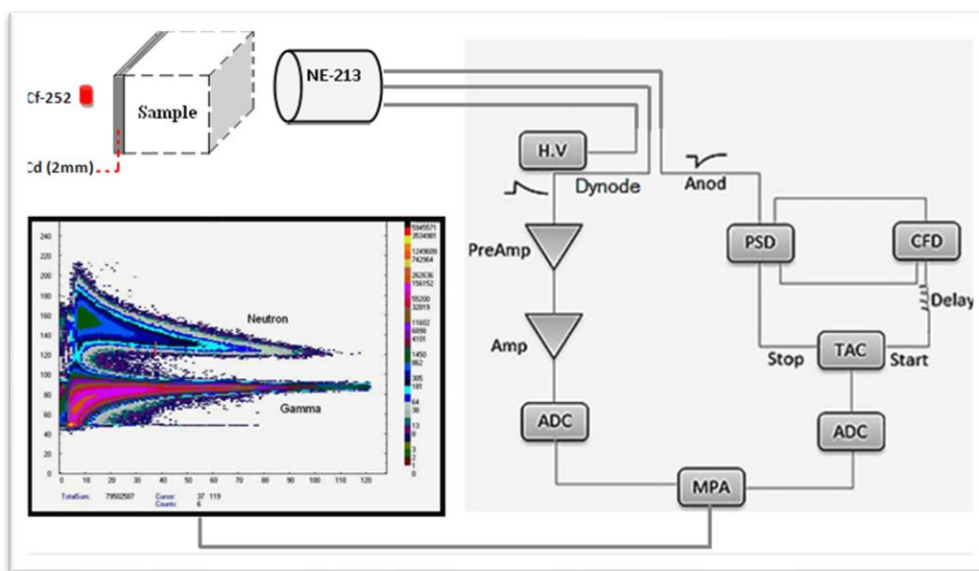


جدول (۱) پارامترهای شکل‌دهی / ثبت پالس و نمونه‌های ارزیابی شده در بررسی جذب نوترون گرمایی ترکیبات پلی‌اتیلن بور دار

نمونه (Sample)	پارامترهای شکل‌دهی و ثبت پالس
BPE1%_ (2.5 cm)	Shaping time: 0.25 μ sec
BPE5%_ (2.5 cm)	Fine gain: 0.89 , Coarse Gain: 10
BPE30%_ (2.5 cm)	H.V: +645 v
BPE_IAP (2.5 cm)	Life time: 300 sec
PE (2.3 cm)	Source: Cf-252 (0.4 mCi)
	Polarity: negative

۲-۲- بررسی جذب نوترون سریع

توان کدکندگی ترکیبات پلی‌اتیلن با درصدهای مختلف بور به مدت ۴۰۰ ثانیه با سه بار تکرار برای هر نمونه به ضخامت‌های ۵، ۷.۵ و ۱۰ سانتی‌متر و تحت پرتودهی چشمه Cf-^{252} با آشکارساز سوسوزن مایع NE-213 با ابعاد $5 \times 5 \text{ cm}$ و با استفاده از مدار جداسازی گذر از صفر شمارش نوترون سریع اندازه‌گیری شده است. آشکارساز ساخت IAP بوده و از ماژول‌های الکترونیکی استاندارد NIM استفاده گردید. شکل (۳) طرحواره چیدمان چشمه، نمونه و آشکارساز و مدار جداسازی مورد استفاده به‌همراه طیف سه بعدی جداسازی تابش نوترون-گاما را نشان می‌دهد.

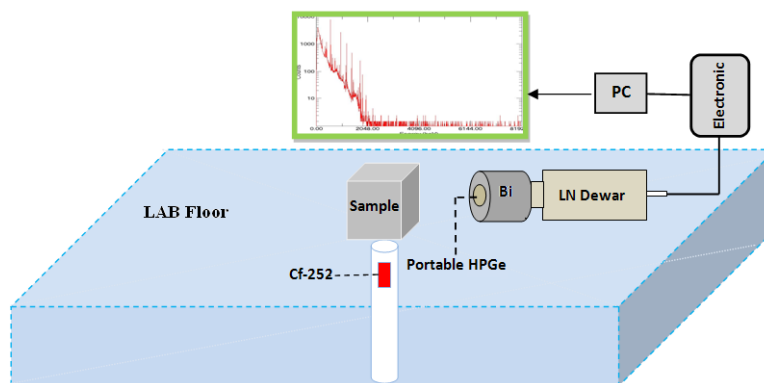


شکل (۳) چیدمان چشمه، نمونه و آشکارساز به‌همراه مدار جداسازی گذر از صفر برای آشکارساز NE-۲۱۳

۲-۳- بررسی تولید گامای ثانویه

بدین منظور از چشمه Cf-^{252} با فعالیت ۰.۴ mCi برای پرتودهی نمونه‌های مختلف استفاده گردید. شکل (۴) نمایی از آزمایش انجام شده را نمایش می‌دهد. چشمه در عمق ۴۰ cm یک کانال با دهانه به قطر ۵ cm داخل زمین قرار گرفت تا نیازی به

حفاظ اضافی وجود نداشته باشد. آشکارساز پرتابل HPGe با بازده ۴۰ درصد نوع n برای ثبت طیف گاما استفاده شد. کریستال این آشکارساز با یک حفاظ بیسموت به ضخامت ۴ cm پوشانده شده و در فاصله ۳۰ cm از دهانه کانال قرار گرفت. طیف نگاری هر نمونه طی ۱۲۰۰ ثانیه انجام شد.

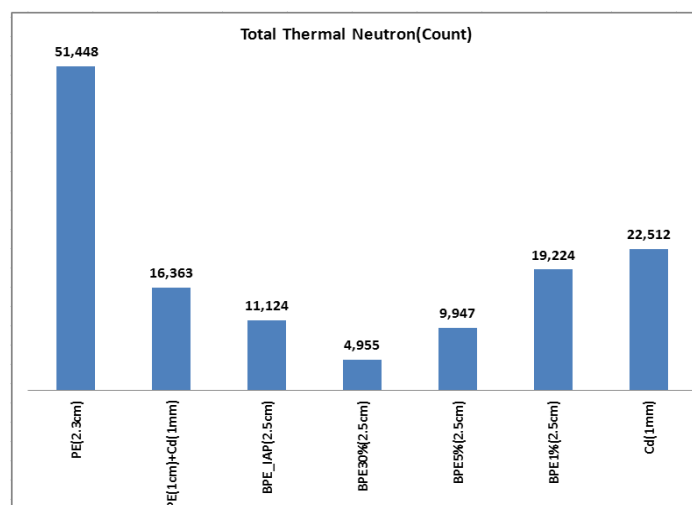


شکل (۴) شماتیک ثبت گامای حفاظ‌های ترکیبی پلی‌اتیلن با درصدهای مختلف بور

۳- نتایج

۳-۱- شمارش نوترون گرمایی

نمودار شکل (۵) نتایج شمارش نوترون گرمایی با استفاده از سوسوزن LiI(Eu) نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان درصد بور در محصولات شرکت شیلد ورکس جذب نوترون گرمایی افزایش یافته است. از این‌رو شار نوترون در ضخامت‌های یکسان حفاظ کاهش داشته است. جذب نوترون کند در پلی‌اتیلن بوردار IAP حدود ۱۲ درصد کمتر از پلی‌اتیلن بور دار ۵٪ شیلد ورکس است. البته مساحت سطح BPE_IAP حدوداً دو برابر نمونه شیلد ورکس می‌باشد که می‌تواند باعث پراکنده شدن نوترون‌های بیشتر به سمت آشکارساز شود.

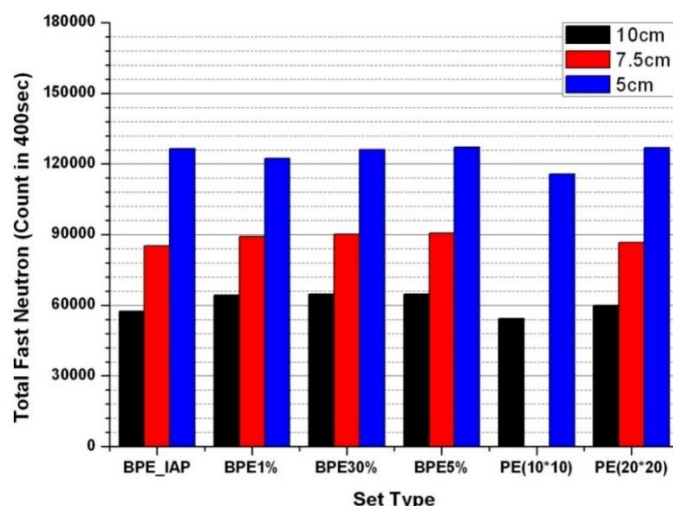


شکل (۵) شمارش نوترون گرمایی با استفاده از سوسوزن LiI(Eu) در ترکیبات پلی‌اتیلن با درصدهای مختلف بور در زمان ۳۰۰ ثانیه



۳-۲- شمارش نوترون سریع

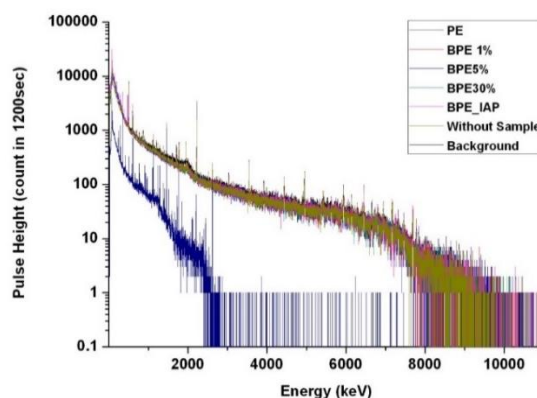
نمودار شکل (۶) تغییرات شمارش نوترون سریع را در نمونه‌های ارزیابی شده نشان می‌دهد. بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۶) نشان می‌دهد که نمونه‌های BPE، ساخت شیلد و رکس نسبت به پلی‌اتیلن معمولی تغییر محسوسی در شار نوترون سریع عبوری ایجاد ننموده‌اند. همچنین این مسئله در خصوص BPE_IAP در مقایسه با پلی‌اتیلن خالص با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ cm صادق است. این بدین معنی می‌باشد که میزان کندکنندگی ترکیبات پلی‌اتیلن بور دار نسبت به پلی‌اتیلن معمولی تقریباً یکسان می‌باشند.



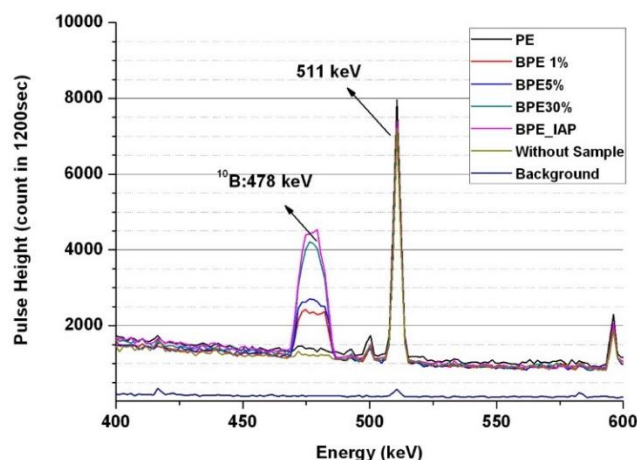
شکل (۶) تغییرات شمارش نوترون سریع در نمونه‌های مختلف با ضخامت‌های ۵، ۷.۵ و ۱۰ سانتی‌متر در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه

۳-۳- تعیین گامای آنی

در شکل (۷) طیف تابش زمینه (بدون وجود چشمه) و طیف نمونه‌های مختلف تا بازه 10 MeV آورده شده است. اما آنچه اهمیت دارد قله 478 keV ناشی از جذب بور می‌باشد که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد. سطح زیر قله برای نمونه‌های شیلد و رکس، متناسب با درصد بور موجود در نمونه می‌باشد. اما برای نمونه حفاظ IAP به دلیل حجم بیشتر نمونه نسبت به نمونه ۵٪ شیلد و رکس، شمارش قله 478 keV عدد بالاتری را نشان می‌دهد [۶،۷].



شکل (۷) طیف گامای آنی نمونه‌های مختلف



شکل (۸) طیف گامای آبی نمونه‌های مختلف، ناحیه انرژی ۴۷۸ keV

۴- بحث و نتیجه گیری

افزایش میزان درصد بور در محصولات شرکت شیلد ورکس منجر به افزایش جذب نوترون گرمایی شده است. جذب نوترون گرمایی پلی‌اتیلن بوردار IAP حدود ۱۲ درصد کمتر از پلی‌اتیلن بور دار ۵٪ شیلد ورکس است. البته این موضوع به علت بزرگ‌تر بودن سطح نمونه‌های IAP و افزایش احتمال پراکندگی نوترون به سمت آشکارساز می‌باشد. شار نوترون سریع عبوری از نمونه‌ها، در نمونه‌های پلی‌اتیلن بوردار و پلی‌اتیلن خالص تقریباً یکسان بوده و در نتیجه کند کنندگی نوترون سریع آن‌ها نسبتاً یکسان است. البته نمونه حفاظ IAP به دلیل استفاده از B ϵ C، سختی بسیار بالایی داشته و دوام بالاتری از آن انتظار می‌رود. در مجموع با استفاده از این روش ارزیابی و بطور مقایسه‌ای می‌توان میزان درصد بور این نوع حفاظ‌ها را به سادگی تعیین نمود.

۵- مراجع

[۱] Szczepaniak, K., & Biziuk, M. (2005). Some applications of neutron activation analysis: a review, *J. Radioanal. Chem.*, 265, 141-150.

[۲] Miri hakimabad, H. Panjeh, H. Vojdani, (2007). Shielding studies on a total-body neutron activation facility, Iran. *J. Radiat. Res.*, 2007; 5 (1): 45-51

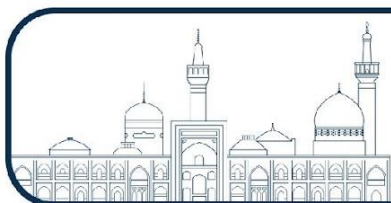
[۳] Yang G., Shi, R., Yang, J., & Tuo, X. (2024). Optimization and shielding design of a thermal neutron device based on DD neutron generator with Geant4 toolkit, *Applied Radiation and Isotopes*, 212, 111483.

[۴] Igashira, M., Kitazawa, H., & Yamamuro, N. (1986). A heavy shield for the gamma-ray detector used in fast neutron experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 245(2-3), 432-437.

[۵] Naqvi, A. A., Al-Matouq, F. A., Khiari, F. Z., Gondal, M. A., & Isab, A. A. (2013). Optimization of a prompt gamma setup for analysis of environmental samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296, 215-221.

[۶] Cardoso, H. A. C., de Barros Melo, S., & Meric, I. (2025). Modeling and geometrization in PGNA. *Computer Physics Communications*, 306, 109360.

[۷] Bayat, E., Afarideh, H., Davani, F. A., & Ghal-Eh, N. (2018). Noise reduction of PGNA spectrum using empirical mode decomposition technique. *Radiation Physics and Chemistry*, 149, 49-53.



مطالعه‌ی پارامترهای سینتیک دزیمتر تجاری $\text{LiF:Mg;Ti(TLD-100)}$ با پرتودهی گاما با

روش‌های مختلف (کد مقاله : ۱۴۱۶)

لاله پوراسد^۱، مصطفی زاهدی‌فر^۱، ناهید حاجیلو^۲، احسان صادقی^۱، سمیه هارونی^۱

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، کاشان-ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کرج، استان البرز، ایران، صندوق پستی ۱۴۹۸/۳۱۴۶۵ : 1498/31465

چکیده

مطالعه‌ی پارامترهای سینتیک دزیمتری ترمولومینسانس به چهار روش مختلف از جمله روش‌های صعود اولیه، افت همدم، برازش منحنی و تندیه‌های متعدد دمایی مشخص می‌شود. در این پژوهش دزیمترهای ترمولومینسانس TLD-100 توسط چشمه‌ی ^{60}Co در دو دز ۳ و ۷ گری پرتودهی شدند. تعداد قله‌ها در منحنی درخشندگی و پارامترهای سینتیک مربوط به قله‌ی پنجم (قله اصلی دزیمتری) تعیین شدند. روش افت هم‌دما و تندیه‌های متعدد دمایی در تعیین تغییرات پارامترهای سینتیک به کار گرفته شد و پارامترهای قله‌ی پنجم در پرتودهی گاما در دز ۳ و ۷ گری با یکدیگر مقایسه شدند که مشاهده شد مقادیر فاکتور فرکانس و انرژی فعال‌سازی با افزایش دز کاهش پیدا کرده است. بر طبق نتایج پارامترهای سینتیک گیراندازی با استفاده از هر دو تکنیک افت هم‌دما و تندیه‌های متعدد دمایی در توافق با یکدیگر بودند. کلیدواژه‌ها: دزیمتر ترمولومینسانس، پرتوی گاما، پارامترهای سینتیک، روش افت هم‌دما، روش تندیه‌های متعدد دمایی.

Studying the kinetic parameters of commercial dosimeter $\text{LiF:Mg;Ti(TLD-100)}$ with gamma irradiation by different methods

Laleh pourassad^۱, Zahedifar Mostafa^۱, Hajilo nahid^۲, Sadeghi Ehsan^۱, Harooni Somayeh^۱

^۱. Department of physics, Faculty of Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.

^۲. Nuclear Sciences and Arts Research Institute, Radiation Application Research Institute, Karaj, Alborz Province, Iran, PO Box: ۱۴۹۸/۳۱۴۶۵

Abstract:

The study of the kinetic parameters of the thermoluminescence dosimetry is determined in four different ways, initial rise, isothermal decay, curve fitting method and variable heating rate. In this study, the thermoluminescence decimeters TLD_{100} was radiated by the ^{60}Co source with doses of ۳ and ۷ Gray. The number of peaks in the glow curve of the thermoluminescence dosimeters TLD_{100} and the kinetic parameters related to the fifth peak (the main peak of the dosimeter) were determined. The method of isothermal decay and variable heating rate was used to determine changes in kinetic parameters, and the fifth peak parameter in the gamma- radiation ۳ and ۷ Gray were compared which was observed that the frequency factor and activation energy values decreased with increased dose. According to the results, the kinetic parameters using both the isothermal decay and the variable heating rate were in agreement with each other.

Keywords: Thermoluminescence dosimeter, Gamma beam, kinetic parameters, Isothermal decay method, Variable Heating Rate Methods.



۱- مقدمه

پدیده‌ی ترمولومینسانس کاربردهای مختلفی دارد که از مهمترین آن می‌توان به دزیمتری اشاره کرد. هدف اصلی دزیمتری، اندازه‌گیری مقدار دز جذب شده در یک نقطه از طریق پرتوهای یونساز می‌باشد. از آنجایی که میزان دز جذب شده در ماده به عدد اتمی موثر آن بستگی دارد و دزیمتر TLD-100 از این نظر بسیار نزدیک به بافت بدن می‌باشد، این دزیمتر بیشترین کاربرد را برای دزیمتری فردی دارد. پارامترهای سینتیک، ماهیت سینتیکی هر قله را مشخص می‌کند، درواقع خطی یا غیر خطی بودن پاسخ TL نسبت به مقدار دز دریافتی یا بستگی مقدار دز دریافتی به آهنگ دریافت دز و یا رفتار سینتیک مرتبه اول، دوم یا هر نوع دیگر سینتیک در موقع آشکارسازی ترمولومینسانس با مطالعه این پارامترها ارتباط دارند. از طرف دیگر بررسی این کمیت‌ها هنگام مطالعه پایداری قله‌های در درجه حرارت‌های بالا دارای اهمیت ویژه‌ای خواهد بود. از روش‌های تعیین پارامترهای سینتیک می‌توان به روش تندی‌های متعدد دما، روش صعود اولیه، روش افت هم دما و روش انطباق منحنی اشاره کرد که در این پژوهش از روش افت هم‌دما و تندی‌های متعدد دمایی جهت تعیین پارامترهای سینتیک دزیمتر ترمولومینسانس TLD-100 در پرتودهی گاما استفاده شده است.

۲- روش کار

قرص‌های TLD-100 به‌صورت لایه‌های نازک با ابعاد $۰.۸۹۹ \times ۳.۱۷۵ \times ۳.۱۷۵$ میلی متر مکعب ساخت کمپانی هارشا تهیه شدند. تعدادی از آن‌هایی که پاسخ‌های مشابه داشتند انتخاب شدند. پس از آن به روی این نمونه‌ها عملیات بازپخت در دمای ۴۰۰°C به مدت یک ساعت و ۱۰۰°C به مدت دو ساعت انجام شد. پرتودهی گاما نمونه‌ها با چشمه ^{۶۰}Co در دز ۳ و ۷ گری انجام شد. پس از پرتودهی نمونه‌ها با دستگاه TLD-reader مدل Harshow4500 در بازه دمایی ۲۵۰°C - ۵۰°C با تندی دمایی $^{\circ}\text{C}/\text{S}2$ قرائت و منحنی‌های درخشش مربوطه ثبت گردید. روش افت هم دما و تندی‌های متعدد دمایی در تعیین تغییرات پارامترهای سینتیک انرژی فعال سازی، مرتبه‌ی سینتیک و فاکتور فرکانس به کار گرفته شد. روش افت هم دما که اولین بار توسط راندال و ویلکینز^{۱۱۸} [۱] و همچنین راسز^{۱۱۹} [۲] ارائه شد. با این فرض که سرعت تونل‌زنی وابسته به دما است، مکانیسم بازترکیب الکترون و حفره را توصیف کرده است. این روش شامل گرم کردن سریع ماده ترمولومینسانس تا یک دمای ثابت مربوط به قله مشخص و نگه‌داشتن آن به مدت معین و ثبت منحنی افت هم‌دما است. بنابراین می‌توان آهنگ واپاشی الکترون به دام افتاده را ارزیابی کرد. شدت ترمولومینسانس مطابق با رابطه‌ی (۱) داده می‌شود:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{S}{N^{b-1}} n^b \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (1)$$

که در آن S فاکتور فرکانس می‌باشد و دارای ابعاد sec^{-1} است، n تعداد الکترونی که در مرکز گیراندازی به دام افتاده است، b مرتبه‌ی سینتیک، E انرژی فعال‌سازی، K ثابت بولتزمن و T دما بر حسب کلوین است. برای محاسبه‌ی پارامترهای سینتیک ابتدا پارامتر (b) باید تعیین شود. پارامتر (b) مشخص‌کننده‌ی نوع رفتار قله در منحنی درخشش است و بدون تعیین این پارامتر، محاسبه‌ی پارامترهای دیگر امکان‌پذیر نخواهد بود. از بین روش‌های موجود برای تعیین این پارامتر، روش استفاده از

^{۱۱۸} Randall and Wilkins

^{۱۱۹} Rácz



منحنی افت هم‌دما به کار گرفته شد. چنانچه رابطه‌ی (۱) را برای یک دمای ثابت در نظر بگیریم، با انتگرال گیری و حل معادله‌ی (۱) نتیجه زیر برای شدت افت هم‌دما مطابق با معادله‌ی زیر به دست می‌آید.

$$I^{(1/b)-1} = a + bt \quad (2)$$

که در آن a و b ثابت و t زمان واپاشی می‌باشد. اگر از طرفین نسبت به زمان مشتق گرفته شود و در نهایت تغییرات منحنی $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ روی محورهای مختصات لگاریتمی برحسب (۱) رسم شود خط راستی با شیب $2-(1/b)$ را می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان مرتبه‌ی سینتیک (b) را به دست آورد.

با استفاده از منحنی‌های افت هم‌دما، انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس که از پارامترهای مهم در پدیده ترمولومینسانس هستند به دست می‌آید. با رسم تغییرات $\left(-\frac{I_0}{I}\right)^{(b-1/b)}$ نسبت به t خط راستی با شیب m به دست می‌آید.

$$m = s(b-1) \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (3)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳) به ازای دو دمای مختلف T_1 و T_2 دو معادله و دو مجهول در شیب‌های m_1 و m_2 به دست آمد و با حل این دو معادله رابطه مربوط به S به دست می‌آید:

$$s = \frac{1}{b-1} \left(\frac{m_2 T_2}{m_1 T_1}\right)^{\frac{1}{T_2-T_1}} \quad (4)$$

با به دست آمدن S و جای‌گذاری در رابطه‌ی بالا، مجهول دوم یعنی E برای قله پنجم در دز ۳ و ۷ گری به دست می‌آید.

در روش تندی‌های متعدد دمایی اگر شدت ترمولومینسانس $\left(-\frac{dn}{dt}\right)$ به صورت تابعی از آهنگ گرمادهی در نظر گرفته شود [۳]، با توجه به انتقال دمای ماکزیمم (T_m) با استفاده از تغییر آهنگ گرمادهی (β)، با تغییر آهنگ حرارت دادن به بلور، شدت نقاط مختلف قله نیز تغییر می‌کند [۴]. نمونه‌های TLD-100 با آهنگ گرمادهی ۱، ۲، ۳، ۵ و ۶ درجه سانتیگراد بر ثانیه برای رسم منحنی‌های تابش توسط دستگاه قرائت گر ترمولومینسانس خوانده شد. با توجه به معادله‌ی (۵):

$$I_m^{b-1} \left(\frac{T_m^*}{\beta}\right)^b = (Sn.)^{-1} \left(\frac{n.E}{bK}\right)^b \exp\left(\frac{E}{KT_m}\right) \quad (5)$$

بعد از تعیین انرژی فعال‌سازی، فاکتور فرکانس با معادله‌ی (۶) به دست می‌آید.

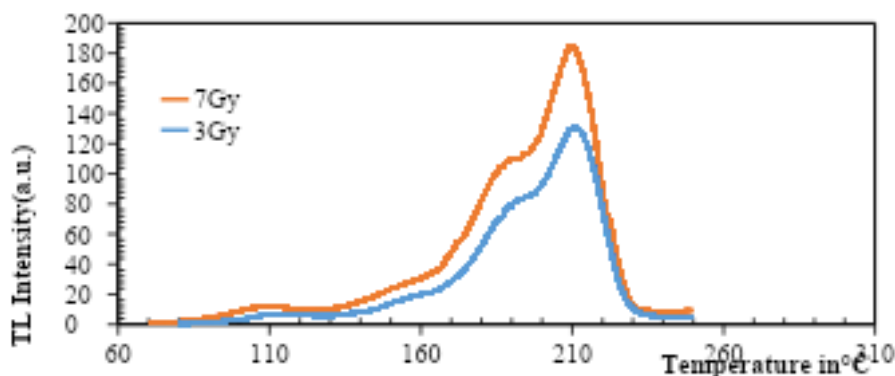
$$\frac{\beta}{T_m^*} = \left(\frac{Sk}{E}\right) [1 + (b-1)\Delta_m] \exp\left(-\frac{E}{kT_m}\right) \quad (6)$$

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی منحنی درخشش ترمولومینسانس و یافتن پارامترهای سینتیک دزیمر TLD-100 ابتدا نمونه‌ها با مقدار دز ۳ و سپس ۷ گری پرتودهی شدند و شدت فوتون‌های گسیل شده برحسب دما به صورت منحنی تابش ترمولومینسانس ثبت

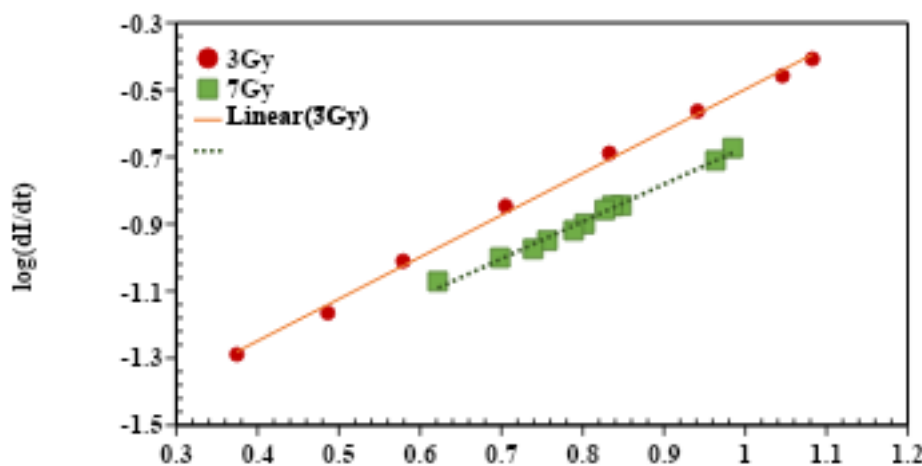


و در شکل ۱ رسم شد. قله‌های کم دمای ترمولومینسانس ناپایدار هستند و محوشدگی در آنها قابل مشاهده است. از این جهت در دزیمتری فردی و محیطی که دزیمتر در مدت طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و احتمال افت در قله‌های کم دما وجود دارد، در هر قرائت دزیمتر به نحوی سعی در حذف این نوع قله‌ها می‌گردد. از قله‌ی اول منحنی درخشش ترمولومینسانس در پرتودهی با استفاده از چشمه‌ی گاما به دلیل محو شدگی زیاد و نیمه عمر کوتاه صرف نظر شده است.



شکل ۱- منحنی درخشش ترمولومینسانس TLD-۱۰۰ در پرتودهی با پرتو گاما در دز ۳ Gy و ۷ Gy.

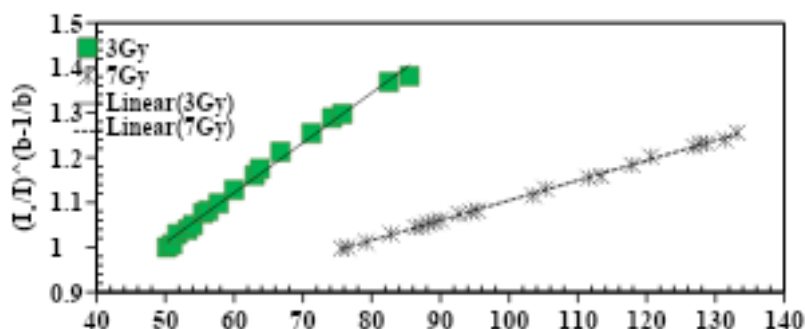
با رسم تغییرات منحنی $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ روی محورهای مختصات لگاریتمی برحسب (I) خط راستی با شیب $(1/b)-2$ به دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان مرتبه‌ی سینتیک (b) را به دست آورد. این نمودار برای TLD-100 در شکل ۲ رسم و مرتبه‌ی سینتیک (b) برای قله‌ی پنجم در دو دز به دست آمد.



شکل ۲- نمودار $\log \frac{dI}{dt}$ بر حسب $\log I$ برای قله‌ی پنجم در پرتودهی با استفاده از چشمه‌ی گاما در دز ۳ Gy و ۷ Gy.

همانگونه که گفته شد، با استفاده از منحنی‌های افت هم‌دما، انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس به دست می‌آید. در شکل

۳ نمودار $\left(\frac{I_0}{I}\right)^{\left(b-\frac{1}{b}\right)}$ بر حسب t برای قله‌ی پنجم پرتودهی با استفاده از چشمه‌ی گاما در دز ۳ Gy و ۷ Gy مقادیر به دست آمده است. در جدول ۱ پارامترهای سینتیک مربوط به هر قله که با استفاده از نمودار شکل ۳ و روابط ۱ تا ۴ بدست آمده اند، ارائه شده است.



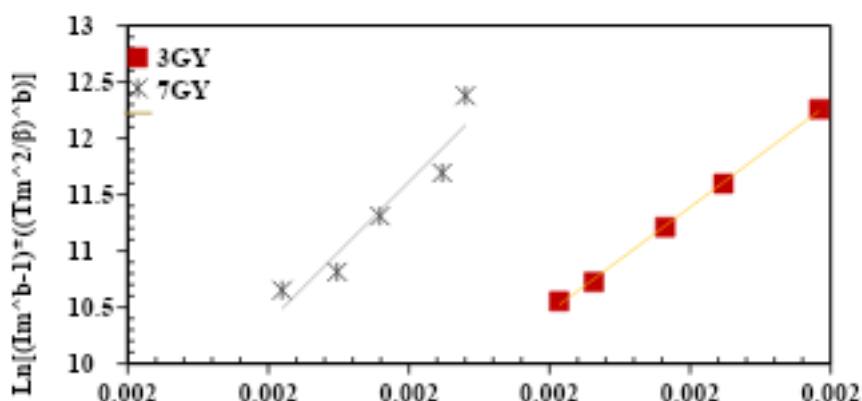
شکل ۳. نمودار $(\frac{I}{I_0})^{(b-\frac{1}{b})}$ بر حسب t برای قله‌ی پنجم در پرتودهی با پرتو گاما در دز ۳ Gy و ۷ Gy

با به‌دست آمدن S و جای‌گذاری در رابطه‌ی (۶)، مجهول دوم یعنی انرژی فعال‌سازی برای قله‌ی پنجم در دز ۳ و ۷ گری به‌دست می‌آید. مقادیر به‌دست آمده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای به‌دست آمده برای قله پنجم در دز ۳ Gy و ۷ Gy با استفاده از روش افت هم‌دما

مرتبۀ سینتیک	فاکتور فرکانس (S^{-1})	$t_{1/2}$ (سال)	انرژی فعال‌سازی (eV)	$T_m(k)$	قله
۳۷/۱	$1.0^{24} \times 78/3$	$1.0^9 \times 6$	۵/۲	۶۹/۴۹۹	Gy3
۵۴/۱	$1.0^{22} \times 11/3$	$1.0^9 \times 6$	۱/۲	۳۴/۵۰۱	Gy 7

همچنین به منظور بررسی پارامترهای سینتیک به روش تندی‌های متعدد دمایی با رسم منحنی تغییرات $\ln[(I_m^{b-1}) \times ((T_m^2/\beta)^b)]$ در مقابل $T_m/1$ خط راستی با شیب E/K به‌دست آمد (شکل ۴). با استفاده از شیب به‌دست آمده روابط (۵ و ۶) انرژی فعال‌سازی (E) برای قله پنجم اندازه‌گیری شد و نتایج محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار $\ln[(I_m^{b-1}) \times ((T_m^2/\beta)^b)]$ بر حسب $T_m/1$ برای قله‌ی پنجم در پرتودهی پرتو گاما در دز ۳ Gy و ۷ Gy



جدول ۲- پارامترهای به دست آمده با استفاده از روش تندی‌های متعدد دمایی ۱۰۰-TLD

مرتبۀ سینتیک b))	فاکتور فرکانس (S^{-1})	انرژی فعال سازی))ev	$T_m(k)$	قله Δ
۰.۹۹/۱	$1.023 \times 10^8 / 3$	۹۶/۱	۴۹۸	۳
۰.۰۶۳/۱	$1.022 \times 10^9 / 2$	۷۵/۱	۴۹۹	۷

۴- نتیجه گیری

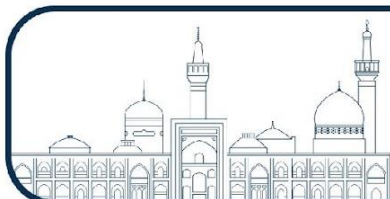
با توجه به نتایج محاسبات انجام شده در پرتو دهی با پرتو گاما، مشاهده شد مقادیر فاکتور فرکانس و انرژی فعال سازی با افزایش دز کاهش پیدا کرده است. با افزایش میزان دز پرتوهای گاما، شدت و پاسخ TL نیز افزایش می‌یابد که موجب افزایش پرتودگی ترازهای دزیمتری می‌شود و این نتیجه می‌تواند به دلیل افزایش آهنگ باز ترکیب تابشی الکترون‌ها و حفره‌ها نسبت به آهنگ باز گیراندازی الکترون‌ها در ترازهای دزیمتری باشد. پس فرار الکترون‌ها از گیرانداز ساده‌تر می‌شود و انرژی گرمایی کمتری برای باز ترکیب الکترون‌ها با حفره نیاز می‌باشد و باعث می‌شود که شدت فوتون‌های گسیل شده در دماهای پایین‌تر به بیش‌ترین مقدار و با ارتفاع قله‌ی بیش‌تری ظاهر شود. همچنین فاکتور فرکانس، فاکتور مهمی برای مشخص کردن عمر گیراندازها می‌باشد. با توجه به اینکه اگر دو مرکز گیراندازی که مقدار انرژی فعال سازی و فاکتور فرکانس یکی از آنها از مراکز گیراندازی دیگری بیش‌تر باشد، اما ممکن است هر دو مرکز گیراندازی عمر متوسط یکسانی داشته باشند. از این جهت که مرکز گیراندازی که انرژی فعال سازی آن زیاد است به این معنی است که عمق گیرانداز آن نیز زیاد است و زیاد بودن فاکتور فرکانس آن را جبران می‌کند و باعث می‌شود یک نیمه عمر مشخصی داشته باشد. بر طبق نتایج پارامترهای سینتیک گیراندازی با استفاده از هر دو تکنیک افت دما و تندی‌های متعدد دمایی در توافق با یکدیگر بودند. همچنین نتایج به دست آمده منطبق با مطالعات انجام شده توسط مصطفی زاهدی فر^{۱۲۰} که در پژوهشی نشان داد میزان دز در مقدار پارامترهای سینتیک نقش دارد، می‌باشد [۵].

۵- مراجع

۱. Randall, John Turton, and Maurice Hugh Frederick Wilkins. "Phosphorescence and electron traps-I. The study of trap distributions." Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences ۱۸۴,۹۹۹ (۱۹۴۵): ۳۶۵-۳۸۹.
۲. Rácz, Z., J. Lumin. ۲۳, ۲۵۵-۲۶۰ (۱۹۸۱).
۳. Chen, Reuven, and S. A. A. Winer. "Effects of various heating rates on glow curves." Journal of applied physics ۴۱,۱۳ (۱۹۷۰): ۵۲۲۷-۵۲۳۲.
۴. Booth AH. Calculation of electron trap depths from thermoluminescence maxima. Canadian Journal of Chemistry. ۱۹۵۴;۳۲(۲):۲۱۴-۲۱۵
۵. Zahedifar; Mostafa. Sadeghi; Ehsan. Sadeghi; Bahareh. Harooni; Somayeh Department of physics , University of kashan ,kashan. Determination of thermoluminescence kinetic parameter of TLD-۱۰۰ (LiF:Mg;Ti) for absorbed doses of ۱ and ۵Gy using variable heating rate, isothermal decay and initial rise methods. (In Persian)

^{۱۲۰} Mostafa Zahedifar

۶. González PR, Azorín J. Thermoluminescent response of LiF: Mg, Cu, P+ PTFE prepared in Mexico to $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta particles. Radiation Physics and Chemistry. ۲۰۰۱ Jun ۱; ۶۱(۳-۶): ۴۲۵-۷.
۷. Reshes G, Eliyahu I, Oster L, Horowitz YS, Biderman S, Ginsburg D, Olko P, Bilski P, Swakon J, Horwacik T. Comparison of optical absorption and thermoluminescence in LiF: Mg, Ti (TLD-۱۰۰) following irradiation by high energy protons and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta rays. Radiation Measurements. ۲۰۲۰ Mar ۱; ۱۳۲: ۱۰۶۲۴۹



ساخت و ارزیابی فیلم‌های نانوکامپوزیتی PVC تقویت شده با SnO_2 به منظور حفاظت از اشعه

ایکس تشخیصی (کد مقاله : ۱۴۱۷)

میلاد امیری^۱، احسان ابراهیمی بسابی^{۱*}، حمید غلامحسینیان^۲، مریم نصرآبادی^۱

^۱ دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای-دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ دانشکده پزشکی- دانشگاه علوم پزشکی مشهد

چکیده:

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه توسعه مواد بدون سرب با ویژگی‌های منحصر به فرد صورت گرفته است که می‌توانند جایگزینی مناسب برای سرب باشند. در این مطالعه، کامپوزیت‌های پایه *PVC* حاوی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد وزنی اکسید قلع و *PVC* خالص به صورت فیلم‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از روش حل‌سازی و قالب‌گیری ساخته شدند. ویژگی‌های ساختاری نانوفیلیم‌ها با استفاده از آزمون‌های *XRD* و کششی تأیید شد. برای ارزیابی خواص محافظتی آن‌ها، از منبع ^{241}Am و مولد پرتو ایکس ۱۲۰ keV استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که کامپوزیت‌های حاوی ۴۰ و ۶۰ درصد وزنی اکسید قلع، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای سرب سنتی هستند.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت، اکسید قلع □ تست کشش، *XRD*، چشمه آمرسیوم-۲۴۱، لامپ پرتو ایکس.

Fabrication and Evaluation of SnO_2 -Reinforced PVC Nanofilms for diagnostic x-ray shielding

Milad Amiri^۱, Ehsan Ebrahimibasabi^۱, Hamid Gholamhosseinian^۲, Maryam Nasrabadi^۱

^۱ Faculty of Physics and Nuclear Engineering, Shahrood University of Technology

^۲ Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences

Abstract:

In recent decades, significant progress has been made in developing lead-free materials with unique properties that are poised to serve as viable substitutes for lead. In this study, PVC-based composites containing ۲۰، ۴۰، and ۶۰ mass percent tin oxide, along with pure PVC, were fabricated as nanofilms using solution casting. The structural properties of the nanofilms were verified through X-ray diffraction (XRD) and tensile tests. To evaluate their protective properties, a ^{241}Am source and a ۱۲۰ keV X-ray tube were employed. The findings indicate that composites with ۴۰ and ۶۰ mass percent tin oxide are promising alternatives to traditional lead.

Keywords: Nanocomposite, SnO_2 , Tensile Test, XRD, ^{241}Am source, X-ray tube.



۱. مقدمه:

از گذشته تا بحال افرادی که با پرتوهای یونیزان و غیر یونیزان سروکار داشته‌اند همواره در معرض خطر بوده‌اند [۱]. برای حفاظت در برابر این پرتوها از مواد با چگالی بالا و عدد اتمی بالا مانند سرب ($Z=82$ و چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۱۱.۳۴) در تاسیسات رادیولوژی استفاده می‌شود [۲، ۳]. با توجه به نیاز روزافزون به حفاظ گذاری و عدم قابلیت سرب بعنوان حفاظی منعطف با وزن بالا و سمیت شدید، محققان را به سمت استفاده از ترکیب مواد ریز ساختار برپایه پلیمرها، رزین اپوکسی و سرامیک‌ها برده است [۴-۶]. این مواد ویژگی‌های خوبی را از خود نشان داده‌اند اما در بین، مواد در مقیاس نانومتر خواص بهینه‌تری نسبت به میکرومتر را از خود نشان داده‌اند [۷]. در سال ۲۰۲۱، سینگ^{۱۲۱} و همکاران، مطالعه‌ای بر روی ویژگی‌های کامپوزیت‌های باریم برپایه شیشه‌های زیست فعال پذیر کار کردند و دریافتند با افزایش درصد مقدار وزنی باریم اکسید (BaO) در ساختار نانوکامپوزیت ویژگی‌های ساختاری و حفاظتی بهبود خواهد یافت [۸]. در سال ۲۰۲۳، لی^{۱۲۲} و همکاران، مشاهده کردند که ترکیب قلع (Sn) و بیسموت (Bi) درون ماتریس پلیمری چرم طبیعی نشان از عملکرد مطلوب ۱۰/۴ درصدی نسبت به سرب است و نتایج تست مکانیکی نیز پاسخ قابل اعتمادی داشتند [۹]. در این مطالعه، کامپوزیت‌های PVC با نانوذرات SnO₂ (با درصدهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد) ساخته شدند تا بررسی شود آیا می‌توانند در زمینه‌های جدید به‌ویژه حفاظت در برابر پرتو به کار روند. برای این منظور، خواص ساختاری و مکانیکی مواد با آزمون‌های XRD و کشش بررسی شد و همچنین پارامترهای حفاظتی (مانند ضریب تضعیف خطی و ضخامت معادل سرب) با استفاده از چشمه ^{۲۴۱}Am و اشعه ایکس ۱۲۰ keV محاسبه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ ساخت نمونه

برای ساخت نمونه‌ها، از پودر PVC و نانوذره اکسید قلع (با خلوص ۹۹.۹۹٪) استفاده شد. همچنین حلال DMF و پلاستیسایزر DOP به کار رفتند. با استفاده از روش حل‌سازی و قالب‌گیری، فیلم‌های PVC خالص و فیلم‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد اکسید قلع تولید شدند [۱۰].

۲-۲ تهیه نانوفیلم کامپوزیتی

ابتدا در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری، ۳۰ میلی‌لیتر از حلال دی متیل فرمامید ریخته و آنرا بر روی هیتر استیرر و بر روی دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و تعداد ۱۲۰۰ دور بر دقیقه قرار می‌دهیم. در مرحله دوم مقدار ۲ گرم از پلیمر را درون حلال اضافه خواهد شد. پس از حل شدن کامل پلیمر درون حلال مقدار درصد وزنی مربوط به هر کامپوزیت را که از رابطه ۱ بدست آمده است را درون محلول اضافه کرده و تا حل شدن کامل نانوذرات SnO₂ درون محلول (که به مدت ۶ ساعت به طول می‌انجامد) بر روی همان دور و همان دما قرار داده شد [۳].

$$Wt\%SnO_2 = \frac{Weight\ of\ SnO_2}{Weight\ of\ PVC + Weight\ of\ SnO_2} \quad (1)$$

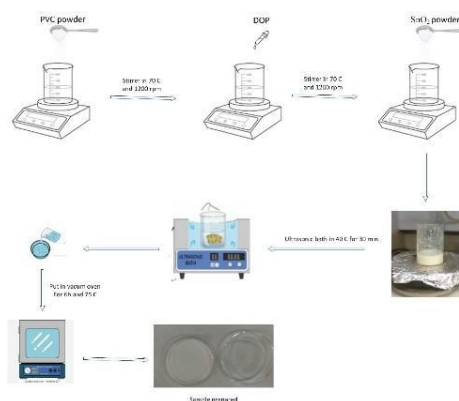
* ۱۰۰

^{۱۲۱} Singh

^{۱۲۲} Li



سپس محلول را به مدت ۳۰ دقیقه درون حمام اولتراسونیک برای آگلومره نشدن ذرات قرار می‌گیرد. بعد از اینکه اطمینان حاصل شد که ذرات بصورت کلوخه‌ای درون محلول قرار نگرفته‌اند به آرامی محلول درون ظرف پتری‌دیش ریخته می‌شود و به مدت ۶ ساعت دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار خواهد گرفت تا بصورت نانوفیلیم‌های موردنظر درآید.



شکل (۱) تصویر طرحواره روش سنتز قالب گیری محلول

۲-۳ آزمون و صحت سنجی

۲-۳-۱ مشخصه یابی XRD

این روش غیرمخرب با تاباندن پرتو ایکس به مواد بلوری و بررسی چیدمان اتم‌ها، ویژگی‌های شبکه بلوری را اندازه‌گیری می‌کند. XRD به طور گسترده برای شناسایی فازها، تحلیل بلورشناختی و مطالعه ساختار فلزات، سرامیک‌ها و لایه‌های نازک استفاده می‌شود. براساس قانون براگ و رابطه دبی-شرر (رابطه ۲)، اندازه کریستال‌های نانومتری از پهنای قله‌های پراش در طیف XRD قابل تخمین است؛ به طوری که کریستال‌های کوچک‌تر قله‌های پهن‌تری تولید می‌کنند. در معادله شرر، D اندازه بلورک، λ طول موج، K فاکتور شکل، β پهنای (FWHM) و θ زاویه پراش است. [۱۱]

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

۲-۳-۲ بررسی میزان مقاومت در برابر کشش

آزمون کشش یکی از روش‌های اصلی برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد است و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری محوری را بررسی می‌کند. این آزمون با ارائه منحنی تنش-کرنش، اطلاعاتی درباره مقاومت، تسلیم، شکل‌پذیری و دیگر خصوصیات مکانیکی فراهم می‌کند و نقش مهمی در طراحی و مقایسه مواد جدید و روش‌های تولید دارد. [۱۲].

۲-۳-۳ سنجش ویژگی‌های حفاظتی در برابر پرتوهای ایکس و گاما

با فرض در نظر گرفتن یک منبع پرتوهای الکترومغناطیس، اگر شدت پرتوهای خروجی از چشمه (پرتوهای فرودی) برابر با I_0 و مقدار شدت پرتوهای عبوری از نمونه‌ای که بین چشمه و آشکارساز قرار گرفته برابر با I باشد بر طبق قانون بیر-لامبرت داریم [۱۳]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

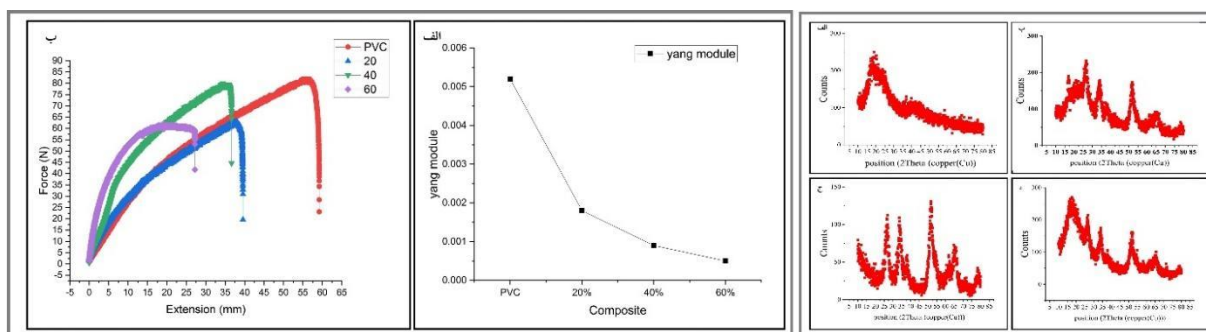


در این حالت، μ به عنوان ضریب تضعیف خطی ماده تعریف می‌شود، در حالی که X نشان‌دهنده ضخامت ماده جاذب است. رسم نمودار $\ln(I/I_0)$ بر حسب X یک خط مستقیم با شیب منفی μ ایجاد می‌کند. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت جاذب، شدت تابش رسیده به آشکارساز به صورت نمایی کاهش می‌یابد [۱۴]. همچنین برای بدست آوردن ضریب تضعیف در انرژی ۱۲۰ keV از رابطه ۳ و دستگاهی که عدد سی‌تی^{۱۲۳} را گزارش خواهند کرد استفاده شده است. ضریب تضعیف خطی آب در این پژوهش برابر با 0.16 cm^{-1} در نظر گرفته شده است [۱۵].

$$HU = \frac{\mu_{com} - \mu_{water}}{\mu_{water}} * 100 \quad (4)$$

۳- نتایج

در تصویر الف از شکل ۲ در زوایای کوچک یک قله پهن مشاهده می‌شود که بیانگر ساختار بی شکل است؛ این قله مربوط به پلیمر است که منطقی است زیرا پلی‌ونیل کلراید یک ماده با ساختار آمورف است. در تصویر ب قله‌های تیزتری مشاهده می‌شود که شبکه‌های منظم‌تری را نسبت به تصویر الف نشان می‌دهد که این منظم تر شدن به دلیل اضافه شدن ماده‌ی فلزی SnO_2 که به مقدار ۲۰ درصد جرمی درون ساختار است. در تصویر ج که دارای قله‌های تیزتر می باشد مربوط به آن است که زمان سنتز برای حل شدن SnO_2 درون PVC بیشتر بوده است. در تصویر د میزان بلورینگی در حد نمونه سوم است با این تفاوت که چون مقدار ماده فلزی SnO_2 در ماده افزایش یافته است، اندازه بلورک‌ها بزرگتر شده است [۱۶]. با استفاده رابطه دبای-شرر و نرم افزار Expert از اندازه بلورک‌ها برای کامپوزیت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب ۲۰، ۹ و ۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد که کوچکتر بودن اندازه بلورک‌ها در نمونه ۴۰ درصد به علت مدت زمان بیشتر فرآیند سنتز و بهتر برای تشکیل بلورک‌ها بوده است.



شکل ۲) طیف مربوط به آزمون XRD (شکل ۳) الف: میزان کاهش مدول یانگ برای هر نمونه. ب: مقدار نیروی اعمالی به هر نمونه.

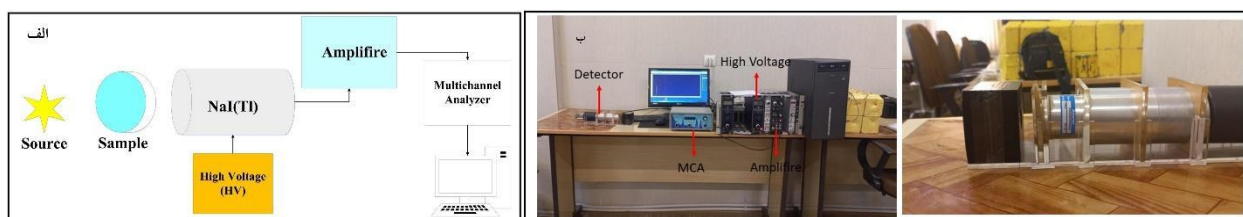
برای بررسی میزان مقاومت نمونه در برابر بیشینه کششی که از جانب دو فک دستگاه نشان داده شده در شکل ۳ از رابطه زیر استفاده خواهیم کرد:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

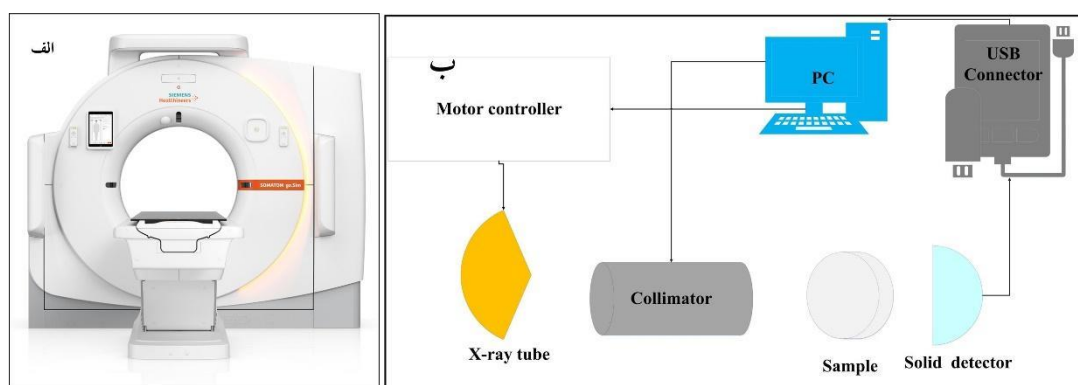
شکل ۳ میزان مقاومت در برابر کشش در نمونه PVC خالص بیشترین مقدار را داشته و با افزایش درصد وزنی ماده SnO_2 میزان مقاومت آن کاهش یافته است؛ بطوریکه این مقدار برای نمونه PVC خالص برابر با $5.2 \times 10^8 \text{ Pa}$ و با افزایش مقدار

درصد وزنی به 20×10^{-3} Pa و برای نمونه 40 درصد وزنی برابر با 10×10^{-4} Pa و برای نمونه 60 درصد Pa 5×10^{-4} می‌رسد

بررسی محافظت در برابر تابش ایکس و گاما با استفاده از نانوذرات، با به‌کارگیری چشمه ^{241}Am که در انرژی 59.9 keV تابش می‌کند، انجام شد. اندازه‌گیری تعداد شمارش‌ها در چیدمانی صورت گرفت که در آن چشمه و آشکارساز (NaI(Tl)) در فاصله 10 سانتی‌متری از یکدیگر قرار داشتند و نمونه‌ها بین این دو جزء قرار داده شدند (شکل‌های ۴). تیوپ اشعه ایکس شبیه‌ساز CT دستگاه SOMATOM.sim برای بررسی تضعیف تابش استفاده شد، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک تیوپ اشعه ایکس، یک کولیماتور، یک آشکارساز فوتون و یک درگاه USB است. تیوپ اشعه ایکس پرتوهایی با انرژی‌های مختلف تولید می‌کند که در این مورد برای اطمینان از دقت، کولیماتور شده‌اند. تصاویر CT سپس از طریق انتقال داده می‌شوند، در حالی که نمونه‌ها بین کولیماتور و آشکارساز قرار گرفته‌اند [۱۴]. ضرایب تضعیف خطی و جرمی از طریق اندازه‌گیری‌های انجام‌شده با استفاده از چشمه ^{241}Am و داده‌های MCA به‌دست آمد. تابش در حضور و عدم حضور نمونه‌ها ثبت شد و مساحت زیر منحنی فوتوپیک طیف در هر دو حالت محاسبه گردید. سپس این مقادیر با استفاده از قانون بیر-لامبرت محاسبه شدند. [۱۳]

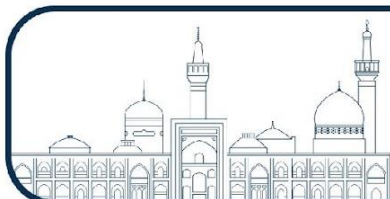


شکل ۴ الف: طرحواره چینش آزمایش. ب: چیدمان آزمایش با چشمه ^{241}Am



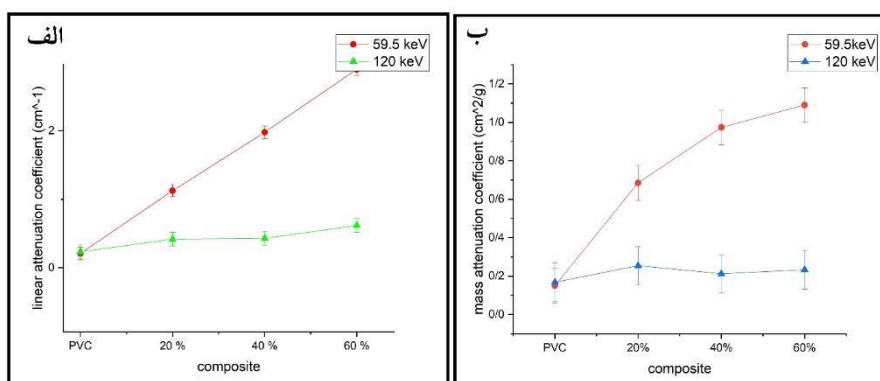
شکل ۵ تصویرالف: دستگاه واقعی ب: طرحواره دستگاه شبیه‌ساز CT

نتایج اندازه‌گیری شده ضریب تضعیف خطی در دو انرژی 59.9 keV و 120 keV برای نمونه‌های فیلم PVC خالص، فیلم نانو کامپوزیت پلیمری با 20 ، 40 و 60 درصد وزنی از نانوذرات SnO_2 در شکل ۶ (سمت چپ) آورده شده است. با توجه به نمودار، مشاهده می‌شود که در انرژی 59.9 keV بصورت کاملاً خطی و در انرژی 120 keV با افزایش درصد نانوذره مقدار



ضریب تضعیف خطی افزایش یافته است. با افزایش انرژی از 59.9 keV به 120 keV مقادیر ضریب تضعیف خطی روند کاهشی داشته‌اند اما برای هر درصد جرمی برای هر انرژی روند افزایشی خود را طی کرده‌اند.

نتایج اندازه‌گیری پارامتر ضریب تضعیف جرمی که یک عامل کلیدی در ارزیابی اثربخشی محافظت در برابر تابش است در شکل ۶ (سمت راست) آورده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید قلع در کامپوزیت پلیمری PVC، ضریب تضعیف جرمی در انرژی 59.9 keV به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به پلیمر، توانایی آن را در جذب تابش افزایش داده است. همانطور که انتظار می‌رود، ضریب تضعیف جرمی در انرژی چشمه ^{241}Am به دلیل احتمال پدیده فوتوالکتریک، بیشتر از انرژی‌های بالاتر است. در انرژی تیوب ایکس 120 keV ، پرتوهای ورودی به نسبت انرژی پایین‌تر اثر کمتری را از خود در ماده بجای گذاشته‌اند. مشاهده شد که با افزایش درصد SnO_2 مقدار ضریب تضعیف جرمی افزایش یافت.



شکل ۶ الف: تغییرات ضریب تضعیف خطی نمونه‌های فیلم پلیمر PVC خالص، نانو کامپوزیت با درصد وزنی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد ب: نمودار مربوط به ضریب تضعیف جرمی برای نمونه‌های مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی پتانسیل کامپوزیت‌های پلیمری برای محافظت در برابر تابش‌های ایکس و گاما می‌پردازد که نمونه‌های فیلمی با استفاده از روش حل‌سازی و قالب‌گیری تهیه شدند، با تمرکز بر تأثیر تغییر درصد وزنی SnO_2 در PVC پارامترهای ضریب تضعیف خطی و ضریب تضعیف جرمی برای انرژی‌های 120 کیلوولت اشعه ایکس و چشمه ^{241}Am مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تغییرات ساختاری آن‌ها توسط پراش پرتو ایکس (XRD) تأیید گردید و افزایش درصد جرمی SnO_2 به ۶۰ درصد باعث افزایش بلورینگی و تضعیف تابش شده است، که راه را برای توسعه مواد محافظتی مؤثر هموار می‌کند و جایگزینی این کامپوزیت را به جای مواد حفاظتی سنتی را مطرح خواهند کرد.

۵- منابع و مراجع

[۱] C.V. More, Z. Alsayed, M.S. Badawi, A.A. Thabet, P.P. Pawar, Polymeric composite materials for radiation shielding: a review, Environmental chemistry letters, ۱۹ (۲۰۲۱) ۲۰۵۷–۲۰۹۰.



- [۲] O. Desouky, N. Ding, G. Zhou, Targeted and non-targeted effects of ionizing radiation, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, ۸ (۲۰۱۵) ۲۴۷-۲۵۴.
- [۳] S. Nambiar, E.K. Osei, J.T. Yeow, Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays, *Journal of applied polymer science*, ۱۲۷ (۲۰۱۳) ۴۹۳۹-۴۹۴۶.
- [۴] N. Moonkum, C. Pilapong, K. Daowtak, G. Tochaikul, Radiation protection device composite of epoxy resin and iodine contrast media for low-dose radiation protection in diagnostic radiology, *Polymers*, ۱۵ (۲۰۲۳) ۴۳۰.
- [۵] L. Gilys, E. Griškonis, P. Griškevičius, D. Adlienė, Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding, *Polymers*, ۱۴ (۲۰۲۲) ۱۶۹۶.
- [۶] S. Wu, W. Zhang, Y. Yang, Progress in Flexible and Wearable Lead-Free Polymer Composites for Radiation Protection, *Polymers*, ۱۶ (۲۰۲۴) ۳۲۷۴.
- [۷] N.A. Galehdari, A.D. Kelkar, Effect of neutron radiation on the mechanical and thermophysical properties of nanoengineered polymer composites, *Journal of Materials Research*, ۳۲ (۲۰۱۷) ۴۲۶-۴۳۴.
- [۸] J. Singh, V. Kumar, Y.K. Vermani, M. Al-Buriahi, J.S. Alzahrani, T. Singh, Fabrication and characterization of barium based bioactive glasses in terms of physical, structural, mechanical and radiation shielding properties, *Ceramics International*, ۴۷ (۲۰۲۱) ۲۱۷۳۰-۲۱۷۴۳.
- [۹] H. Li, J. Zhou, L. Yan, R. Zhong, Y. Wang, X. Liao, B. Shi, Barbican-inspired bimetallic core-shell nanoparticles for fabricating natural leather-based radiation protective materials with enhanced X-ray shielding capability, *Chemical Engineering Journal*, ۴۶۶ (۲۰۲۳) ۱۴۳۳۵۵.
- [۱۰] S.E. Putri, D.E. Pratiwi, R.T. Tjahjanto, N.M. Ilyas, D. Tahir, A. Rahman, H. Heryanto, Effect of Sintering Temperature on the Microstructure Behavior of Gelcasted Porous Ceramics Using Cassava Starch as Pore Template, *Indonesian Journal of Chemistry*, DOI (۲۰۲۳).
- [۱۱] E. Glazkova, O. Bakina, N. Rodkevich, A. Mosunov, E. Vornakova, V. Chzhou, M. Lerner, Copper ferrite/copper oxides (I, II) nanoparticles synthesized by electric explosion of wires for high performance photocatalytic and antibacterial applications, *Materials Science and Engineering: B*, ۲۸۳ (۲۰۲۲) ۱۱۵۸۴۵.
- [۱۲] J.R. Davis, Tensile testing, *ASM international* ۲۰۰۴.
- [۱۳] I. Oshina, J. Spigulis, Beer-Lambert law for optical tissue diagnostics: current state of the art and the main limitations, *Journal of biomedical optics*, ۲۶ (۲۰۲۱) ۱۰۰۹۰۱-۱۰۰۹۰۱.
- [۱۴] A. Mousa, K. Kusminarto, G.B. Suparta, A new simple method to measure the X-ray linear attenuation coefficients of materials using micro-digital radiography machine, *Int. J. Appl. Eng. Res*, ۱۲ (۲۰۱۷) ۱۰۵۸۹-۱۰۵۹۴.
- [۱۵] F.M. Khan, J.P. Gibbons, Khan's the physics of radiation therapy, Lippincott Williams & Wilkins ۲۰۱۴.
- [۱۶] B. Gopalakrishna, N. Nagaraju, K. Ventakesh, D. Xiao, N. Kathyayini, Studies on the influence of weight percentage of multiwalled carbon nanotubes in Mn/Ni/Co nanocomposites for hybrid supercapacitors, *Inorganic Chemistry Communications*, ۱۲۴ (۲۰۲۱) ۱۰۸۳۷۱.

پتانسیل روغن خوراکی برای دزیمتری گذشته نگر در حوادث پرتوی (کد مقاله : ۱۴۱۹)

عدالتخواه، الهام

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده:

دزیمتری گذشته‌نگر از روشهای متداول تخمین دز در صورت وقوع حوادث پرتوی و عدم دسترسی به دزیمتر به شمار میرود. در این پژوهش، امکان استفاده از روغن خوراکی به عنوان دزیمتر گذشته‌نگر بررسی شد. این انتخاب باتوجه به فراوانی بالای روغن خوراکی در سراسر جهان صورت گرفت. نمونه‌های روغن مایع مخصوص پخت و پز ساخت داخل کشور با استفاده از گاماسل-۲۲۰ در محدوده دز $1-25 \text{ kGy}$ پرتودهی شدند. سپس اندازه‌گیری جذب نمونه‌ها با استفاده از طیفسنج نوری انجام شد. مقایسه طیف جذب نمونه‌های روغن پرتودهی شده با نمونه‌های روغن پرتودهی نشده، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را متناسب با دز جذبی نشان میدهد. بنابراین روغن خوراکی میتواند به عنوان دزیمتر گذشته‌نگر نوین برای حوادث پرتوی معرفی شود

کلمات کلیدی: دزیمتر گذشته نگر، حوادث پرتوی، طیفسنج نوری، روغن خوراکی.

The potential of edible oil as a new retrospective dosimeter for radiological accidents

Edalatkhah, Elham^{۱*}

۱. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

Retrospective dosimetry is one of the common methods of dose estimation in case of radiation accidents and lack of access to a dosimeter. In this research, the possibility of using edible oil as a retrospective dosimeter in case of radiation accidents was investigated. This choice has been made due to the high abundance of edible oil around the world. Samples of liquid cooking oil made in the country were irradiated using Gammacell-۲۲۰ in the dose range of $1-25 \text{ kGy}$. Then, the absorbance of the samples was measured using a spectrophotometer. The comparison of the absorbance spectrum of irradiated oil samples with unirradiated oil samples shows noticeable changes proportional to the absorbed dose. Therefore, edible oil can be introduced as a new retrospective dosimeter for radiation accidents.

Key words: Retrospective dosimeter, Radiation accidents, Spectrophotometry, Edible oil.



۱ - مقدمه:

خطای انسانی، نقص فنی، خطای حمل و نقل، سرقت یا مفقود شدن منبع پرتوزا و یا شکستن کپسول حاوی چشمه از جمله عواملی هستند که منجر به پرتوگیری غیرعادی و بیش از حدود مشخص میشوند. با گسترش استفاده از فناوری هسته‌ای در کاربردهای مختلف پزشکی، صنعتی، کشاورزی و پژوهشی، احتمال وقوع حوادث پرتوی رو به افزایش است. تاکنون در سراسر جهان حوادث گوناگونی چون انفجار هسته‌ای در هیروشیما و ناکازاکی، حوادث نیروگاه‌های اتمی نظیر حادثه چرنوبیل، حادثه تری مایل ایلند و فوکوشیما، حادثه تاسیسات سوخت هسته‌ای نظیر حادثه توکای مورای، حادثه پخش مواد پرتوزا در گوانیای و حادثه پرتوگیری حاد در تأسیسات تابش گامای السالوادور، در مرکز پرتودرمانی پاناما و در نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان گزارش شده‌اند. بنابراین داشتن برنامه و آمادگی لازم جهت مدیریت حوادث پرتوی در سطوح مختلف امری ضروری است [۱].

اثرات حوادث پرتوی محدود به مرزهای جغرافیایی و لحظات اولیه پس از حادثه نیست. این حوادث میتوانند آثار جبران ناپذیر بیولوژیکی و زیست محیطی برای افراد جامعه و نسلهای آینده ایجاد نمایند. سرعت و دقت در عملیات امداد رسانی اهمیت بالایی در کاهش اثرات دارد. بنابراین اندازه‌گیری پرتو در صورت وقوع حادثه از اهمیت بالایی برخوردار است. درواقع نتایج اندازه‌گیری تعیین‌کننده بهترین روش مداخله‌ای برای افرادی است که در معرض پرتوگیری بر اثر حادثه بوده‌اند. اگر در محل وقوع حادثه دزیمتری نباشد، لازم است دز دریافتی تخمین زده شود. از روشهای مرسوم تعیین دز پس از حادثه استفاده از دزیمتری گذشتہنگر^{۱۲۴} است. بدین منظور معمولاً از موادی که به طور طبیعی در محیط حادثه در دسترس هستند استفاده میشود [۲].

از جمله موادی که اغلب در حوادث پرتوی یافت شده و برای دزیمتری گذشتہنگر استفاده شده‌اند میتوان به سرامیک، بلوک بتنی، سیمان، آجر، سنگ مرمر و کاشی اشاره کرد [۳-۴]. نمونه‌های دیگر شامل آن دسته از مواد مبتنی بر الکترونیک هستند که از ابزارهایی که افراد در معرض پرتو مکرراً به آنها دسترسی دارند گرفته شده‌اند از جمله قطعات الکترونیکی در تلفن‌های همراه مانند تراشه الکترونیکی، خازن، مقاومت و مدارهای مجتمع، دوربینهای دیجیتال، درایوهای فلش و ساعت‌های دیجیتال [۵-۶]. همچنین برخی از اجزای غیرالکترونیکی تلفن‌های همراه نیز برای اندازه‌گیری دز مورد بررسی قرار گرفته‌اند مانند صفحه نمایش شیشه، شیشه صفحه لمسی و محافظ صفحه تلفن همراه [۷-۸]. مواد بیولوژیکی استخراج شده از افراد در معرض نیز برای ارزیابی دز در حوادث بکار رفته‌اند مانند ترمیم دندان، مینای دندان و کامپوزیت‌ها، ناخن، هیدروکسی آپاتیت در استخوان [۹-۱۰]. سایر مواد پرتوفرار که برای ارزیابی دز مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: کارت‌های شناسایی شخصی، کارت‌های اعتباری، مواد مبتنی بر شیشه، تنقلات و مداد رنگی [۱۱-۱۲]. بازسازی دز با استفاده از این مواد با کاستی‌های بسیاری روبرو است مانند حداقل محدودیت‌های تشخیص، آماده‌سازی نمونه پیچیده، در دسترس نبودن برخی روشهای اندازه‌گیری پرهزینه، درمان تهاجمی و بازبایی اطلاعات زمان‌بر. این موارد منجر به عدم قطعیت قابل توجهی در بازسازی دز محل حادثه میشود. بنابراین، همچنان محققان درصدد یافتن یک ماده مقرون به صرفه و بسیار توزیع شده برای دزیمتری گذشتہنگر میباشند [۱۳].

^{۱۲۴} Retrospective Dosimetry



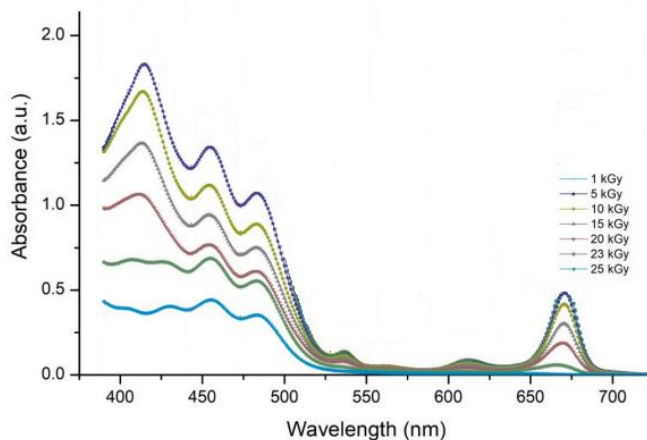
با وجود اینکه نمک خانگی تقریباً در سراسر جهان در دسترس است و فرمول شیمیایی پایداری دارد، مطالعات انجام شده در استفاده از آن به عنوان روشی برای اندازه‌گیری دز در سال ۲۰۲۰ نشان داد که در محدوده دز تا ۱۵ Gy قابلیت استفاده دارد. نمک پس از اندازه‌گیری به روش ترمولومینسانس، اطلاعات دز ذخیره شده در خود را از دست می‌دهد. بنابراین نیاز به دزیمتری در محدوده دز بالا همچنان احساس می‌شود [۱۴-۱۵]. در این پژوهش، با توجه به اینکه یکی از رایجترین مواد فراوان در سراسر جهان روغن خوراکی است، پیشنهاد داده شد که از روغن خوراکی به عنوان دزیمتر نوین گذشت‌هنگر برای حوادث پرتوی استفاده شود.

۲- روش کار:

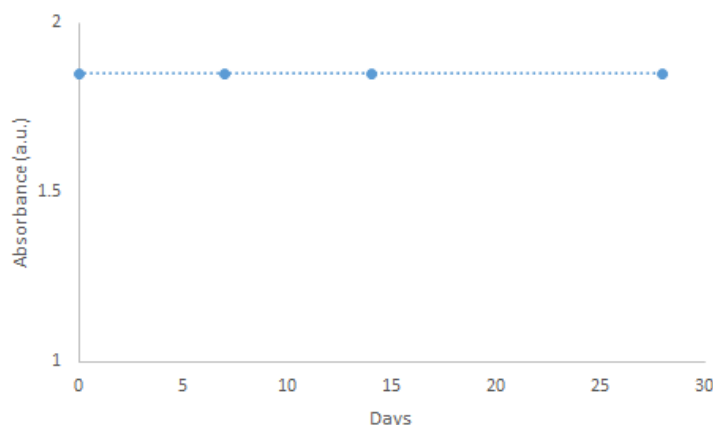
در این پژوهش، روغن مایع مخصوص پخت و پز ساخت داخل کشور با تاریخ تولید جدید از سوپرمارکت تهیه شد. این روغن خوراکی ترکیبی از روغنهای خالص آفتابگردان و سویا می‌باشد. نگهداری روغن در شرایط محیطی مشابه با شرایط مورد انتظار هنگام جمع‌آوری روغن در صورت وقوع حادثه اهمیت دارد. نمونه‌های روغن در بطریهای کوچک با حجم ۱۰ ml ریخته شد. نمونه‌ها محکم بسته شدند و در دمای اتاق قرار گرفتند. به منظور بررسی اثر پرتو گاما بر روغن، پرتودهی نمونه‌ها توسط گاماسل-۲۲۰ در محدوده دز ۱-۲۵ kGy با آهنگ دز ۰/۶۴ Gy/s انجام شد. سه نمونه در هر دز برای بررسی تکرارپذیری پرتودهی شدند. طیف جذب نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنج نوری Beckman-Coulter-DU ۸۰۰ اندازه‌گیری شد. بدین منظور، نمونه روغن در سلول شیشه‌ای طول مسیر نوری ۱ cm ریخته شد. برای بررسی محوشدگی پاسخ، جذب نمونه‌ها در زمانهای متفاوت پس از پرتودهی ثبت شد.

۳- نتایج:

شکل ۱ طیف جذب نمونه‌ها را در محدوده طول موج ۴۰۰-۷۰۰ nm برای دزهای متفاوت نشان می‌دهد. در طیف ثبت شده در هر دز هفت قله مشاهده شد. اولین قله که در طول موج ۴۱۵ nm واقع است به عنوان قله دزیمتری در نظر گرفته شد. چون تغییرات جذب در این قله با دز جذبی به خوبی قابل تعریف است. همانطور که مشاهده می‌شود جذب با کاهش دز جذبی افزایش می‌یابد. بررسی اثر پرتو بر روغنهای خوراکی متأثر از ترکیب اسیدهای چرب می‌باشد. روغنهای مخصوص پخت و پز دارای سه نوع اسید چرب هستند: چربی تک غیر اشباع، چربی با چند پیوند غیر اشباع و چربیهای اشباع شده. روغن‌ها بر اساس بیشترین میزان اسید چرب دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین نتایج مذکور تنها نشان‌دهنده اثر پرتو بر ترکیب روغنهای آفتابگردان و سویا می‌باشد. برای بررسی محوشدگی پاسخ دزیمتر، جذب نمونه‌های روغن در طول موج ۴۱۵ nm (قله دزیمتری) تا ۲۸ روز پس از پرتودهی اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل (۲) با گذشت یک، دو و چهار هفته پس از پرتودهی با دز ۱ kGy آورده شده است. تغییراتی در جذب نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. بنابراین، روغن خوراکی محوشدگی پاسخ دز چندانی ندارد و می‌تواند به عنوان دزیمتر گذشت‌هنگر استفاده شود.



(۱) طیف جذب نمونه‌های روغن خوراکی.



(۲) جذب نمونه‌های روغن در زمان‌های متفاوت پس از پرتودهی.

۴ - بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، امکان استفاده از روغن خوراکی به عنوان دزیمتر گذشت‌نگر در صورت وقوع حوادث پرتوی بررسی شد. روش مورد استفاده، روشی غیرمخرب، سریع و بدون آماده‌سازی نمونه می‌باشد. بررسی اولیه نشان داد که روغن خوراکی در محدوده ۱-۲۵ kGy دزیمتر مناسبی است. مطالعات تکمیلی در حال انجام است. نتایج این پژوهش، افق‌های جدیدی را برای محققین می‌گشاید تا به بررسی اثر پرتو بر انواع روغن و مقایسه آنها بپردازند.

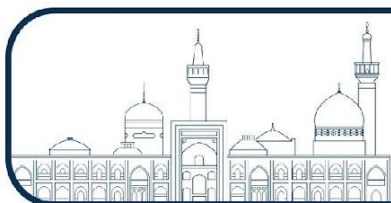
۵ - مراجع:

[۱] Ramzaev, V. et al. An assessment of cumulative external doses from Chernobyl fallout for a forested area in Russia using the optically stimulated luminescence from quartz inclusions in bricks, J. Environ. Radioact. ۹۹, ۷, ۲۰۰۸, ۱۱۵۴-۱۱۶۴.

[۲] Elashmawy, M., Study of constraints in using household NaCl salt for retrospective dosimetry, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, ۴۲۳, ۲۰۱۸, ۴۹-۶۱.



- [۳] Yasmin, S. et al. The potential of decorative building materials (marble) for retrospective thermoluminescence dosimetry. *Appl. Radiat. Isot.* ۱۷۵, ۲۰۲۱, ۱۰۹۷۸۲.
- [۴] Goksu, New approaches to retrospective dosimetry using cementitious building materials. *Radiat. Meas.* ۳۷, ۴, ۲۰۰۳, ۳۲۳-۳۲۷.
- [۵] Beerten, K. Thermoluminescence dosimetry of electronic components from personal objects. *Radiat. Meas.* ۴۴, ۵, ۲۰۰۹, ۶۲۰-۶۲۵.
- [۶] Goksu, H.Y. Telephone chip cards as individual dosimeters. *Radiat. Meas.* ۳۷, ۶, ۲۰۰۳, ۶۱۷-۶۲۰.
- [۷] Chandler, J.R. et al. Optically stimulated luminescence dosimetry on mobile phone back protective glass. *Physics Open.* ۷, ۲۰۲۱, ۱۰۰۰۷۲.
- [۸] Bassinet, C. TL investigation of glasses from mobile phone screen protectors for radiation accident dosimetry. *Radiat. Meas.* ۱۳۶, ۲۰۲۰, ۱۰۶۳۸۴.
- [۹] Desmet, C. et al. Tooth retrospective dosimetry using electron paramagnetic resonance: influence of irradiated dental composites. *PLOS One*, ۱۰, ۲۰۱۵, ۰۱۳۱۹۱۳.
- [۱۰] Bailiff, et al. Luminescence characteristics of dental ceramics for retrospective dosimetry: a preliminary study, *Radiat. Protect. Dosim.* ۱۰۱, ۱, ۲۰۰۲, ۵۱۹-۵۲۴.
- [۱۱] Mathur, V.k. et al. Radiation sensitivity of memory chip module of an ID card. *Radiat. Meas.* ۴۲, ۱, ۲۰۰۷, ۴۳-۴۸.
- [۱۲] Meriç, N. et al. Thermoluminescence properties of irradiated commercial color pencils for accidental retrospective dosimetry, *Appl. Radiat. Isot.* ۹۹, ۲۰۱۵, ۹۷-۱۰۴.
- [۱۳] Ainsbury, E.A. et al. Review of retrospective dosimetry techniques for external ionizing radiation exposures, *Radiat. Protect. Dosim.* ۱۴۷, ۴, ۲۰۱۱, ۵۷۳-۵۹۲.
- [۱۴] Gaikwad, S.U. et al. Development of NaCl-based optically stimulated luminescent phosphors for the possible applications in dosimetry. *Radiat. Protect. Dosim.* ۱۹۲, ۱, ۲۰۲۰, ۲۷-۳۵.
- [۱۵] Ahmad, et al. Thermoluminescence study of pellets prepared using NaCl from Khewra Salt Mines in Pakistan. *Radiat. Environ. Biophys.* ۶۰, ۲۰۲۱, ۳۶۵-۳۷۵.
- [۱۶] Said, H. et al. Possibility of using olive oil as a novel dosimeter in radiological accidents: First experimental results. *Radiat. Meas.* ۱۶۲, ۲۰۲۳, ۱۰۶۹۲۲.



به کارگیری قابلیت جدید MCNP6 در تعریف تابش های زمینه در شبیه سازی مونت کارلوی

طیف خروجی آشکارساز HPGe (کد مقاله: ۱۴۸۶)

سرشوق، سمیرا^۱ - سینا، صدیقه^{۲،۳} - زارعی، محمدعلی^۴

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

۲- بخش مهندسی هسته ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- مرکز تحقیقات تابش، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴- گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده:

آشکارسازهای ژرمانیوم با خلوص بالا (*HPGe*) یکی از رایج ترین آشکارسازهای مورد استفاده در طیف نگاری اشعه ایکس و پرتو گاما هستند لیکن تعیین تجربی طیف خروجی و تابع پاسخ آنها نیاز به الزامات خاصی داشته و در بسیاری از موارد شبیه سازی سیستم طیف نگاری بر پایه کد *MCNP* به عنوان روشی جایگزین انجام می گردد. در این تحقیق از دو قابلیت جدید نسخه ۶.۱ این کد در بهبود نتایج شبیه سازی استفاده شده و طیف خروجی حاصل از شبیه سازی با طیف خروجی تجربی این آشکارساز مقایسه شده است. نتایج حاکی از تأثیر این دوقابلیت در تطابق داده های شبیه سازی و تجربی است.

کلمات کلیدی: شبیه سازی مونت کارلو، طیف نگاری گاما، *MCNP*، آشکارساز *HPGe*، تابش زمینه

Applying the new MCNP^۶ capability to define background radiation in Monte Carlo simulation of HPGe detector output spectrum

Sarshough, Samira^{۱*}, Sina, Sedigheh^{۲،۳}, Zarei, Mohammad Ali^۴

^۱. Faculty of Engineering, Jahrom University, Jahrom, Fars, Iran

^۲. Department of Nuclear Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

^۳. Radiation Research Center, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

^۴. Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract:

High-purity germanium (HPGe) detectors are one of the most commonly used detectors in X-ray and gamma-ray spectroscopy, but the experimental determination of their output spectrum and response function requires special requirements, and in many cases, the simulation of the spectroscopic system based on the MCNP code is performed as an alternative method. In this study, two new features of version ۶.۱ of this code are used to improve the simulation results, and the output spectrum obtained from the simulation is compared with the experimental output spectrum of this detector. The results indicate the effect of these two features on the agreement between the simulation and experimental data.

Key words: Monte Carlo simulation, Gamma spectroscopy, MCNP^۶, HPGe detector, background radiation



۱- مقدمه:

آشکارسازهای ژرمانیوم با خلوص بالا (HPGe) به دلیل وضوح بالا و حساسیت به تابش ورودی که تمایز بین فوتون‌هایی با انرژی‌های بسیار نزدیک را امکان‌پذیر می‌کنند، یکی از رایج‌ترین آشکارسازهای مورد استفاده برای طیف‌نگاری اشعه ایکس و پرتو گاما هستند [۱]. با این وجود، تعیین تجربی طیف خروجی و تابع پاسخ آشکارسازهای HPGe مشکلاتی را به همراه داشته و این امر به چشمه‌های استاندارد که ترکیبی از رادیونوکلئیدهای مختلف هستند نیاز دارد و می‌بایستی هندسه شمارش چشمه‌های استاندارد و نمونه‌های مورد اندازه‌گیری یکسان باشد. روش دیگر برای تعیین تابع پاسخ آشکارساز، روش مونت کارلو است [۲]. روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای حل مسائل مختلف در مورد ترابرد فوتون و ذرات مختلف به سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود. یکی از کاربردهای نسبتاً ساده اما بسیار مفید در این زمینه مربوط به شبیه‌سازی دستگاه‌های طیف‌نگاری پرتو گاما بر پایه Ge است [۳]. با اعمال این روش بر سیستم‌های طیف‌نگاری گاما می‌توان تابع پاسخ آشکارساز را تعیین کرده و در استفاده از منابع زمانی و مالی صرفه‌جویی کرد.

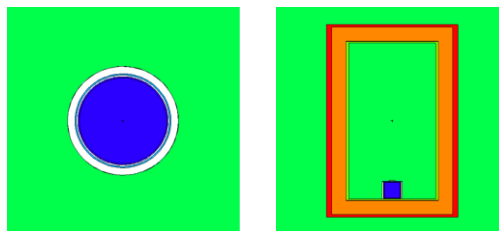
تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه شبیه‌سازی کامل آشکارسازهای HPGe با استفاده از نسخه‌های قدیمی کد MCNP و استخراج منحنی پاسخ و منحنی‌های بازده آنها و همچنین استفاده از این آشکارسازها در بررسی نمونه‌های محیطی صورت گرفته لیکن اضافه شدن دو قابلیت جدید به نسخه ۶.۱ این کد تطابق نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی را بهبود بخشیده و دقت محاسبات را افزایش خواهد داد.

اولین قابلیت اضافه شده استفاده از منحنی پاسخ داخلی MCNP برای آشکارسازهای فوتونی یا همان کارت FTn گزینه است. این گزینه مشخصات منحنی پاسخ آشکارسازهای فوتونی را بهبود بخشیده و برای آشکارسازهایی نظیر ^{228}Ac ، ^{22}Na ، ^{40}K ، ^{60}Co ، ^{137}Cs و ^{252}Cf در دسترس است لیکن تاثیر این قابلیت در مورد آشکارسازهایی نظیر سوسوزن که در آنها در اثر برخورد فوتون‌های گاما و ایکس نور تولید شده و سپس نور به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود قابل توجه‌تر است. در کد MCNP از تالی $^{\text{F}}\text{8}$ جهت ایجاد پالس و به دنبال آن محاسبه طیف استفاده می‌شود لیکن این تالی بر اساس انرژی‌های عبوری از سطوح تشکیل دهنده حجم مؤثر آشکارساز مورد نظر محاسبه می‌گردد. استفاده از قابلیت $^{\text{F}}\text{8}$ به همراه کارت FTn این محدودیت را از بین برده و پالس‌های ناشی از انرژی بر جای گذاشته درون حجم آشکارساز ثبت می‌شوند. قابلیت جدید دیگر این کد امکان شبیه‌سازی تابش‌های زمینه با داشتن مختصات جغرافیایی محل مورد نظر است. به نسخه جدید این کد پایگاه داده‌ای از تابش‌های نوترون و گاما‌های زمینه برای مکان‌های مختلف روی سطح زمین اضافه شده و به عنوان یک نوع چشمه در کارت SDEF در دسترس است [۴].

در این تحقیق آشکارساز HPGe از نوع p-type موجود در مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز با در نظر گرفتن قابلیت‌های جدید MCNP و در حضور چشمه‌های استاندارد ^{60}Co و ^{137}Cs شبیه‌سازی شد و طیف حاصل از آن با طیف خروجی تجربی این آشکارساز مقایسه گردید.

۲- روش کار:

در مرحله اول مشخصات دقیق هندسه آشکارساز و همچنین چشمه مورد استفاده جمع‌آوری شده و هندسه طیف‌نگاری شبیه‌سازی شد. لازم به ذکر است جهت تعیین ابعاد دقیق آشکارساز، از آشکارساز HPGe مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز در پژوهش‌های پیشین چندین عکس رادیولوژی در جهات مختلف به وسیله دستگاه X-ray صنعتی گرفته شده است و در این تحقیق از نتایج آنها استفاده شده است [۵]. در شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی شده از دو نما نشان داده شده است. لازم به ذکر است در فایل ورودی MCNP جهت ساده‌سازی قسمت‌های الکترونیکی شبیه‌سازی نشده است.



شکل (۱) نمای XZ از آشکار ساز شبیه سازی شده و حفاظ اطراف آن (سمت راست) نمای XY از آشکار ساز شبیه سازی شده (سمت چپ)

پس از آن با داشتن طول، عرض و ارتفاع جغرافیایی آزمایشگاه طیف نگاری مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز و تعریف تابش زمینه به عنوان چشمه در کد ۶MCNP، طیف حاصل از آن شبیه سازی گردید. لازم به ذکر است در ۶MCNP برای تعریف تابش زمینه گاما در کارت SDEF می بایستی در مقابل پارامتر par کلمه کلیدی bp- را وارد کرده و از کارت loc جهت تعیین مختصات جغرافیایی در کارت SDEF استفاده کرد. در گام بعدی با داشتن مشخصات چشمه استاندارد مورد استفاده در آزمایشات تجربی، کارت SDEF تکمیل گردید. در این پژوهش طیف حاصل از چشمه های استاندارد ۶-Co و ۶-Cs- ۱۳۷ که با استفاده از آشکار ساز HPGe ثبت شده با داده های حاصل از شبیه سازی آنها مقایسه گردید. مشخصات چشمه های مورد استفاده در نتایج تجربی در جدول ۱ آمده است. این چشمه ها به شکل دیسک با قطر تقریبی ۲۵mm بوده و اکتیویته آنها در زمان طیف نگاری با استفاده از تابع نمایی $I = I_0 \exp(-\lambda t)$ محاسبه گردید.

جدول ۱: مشخصات چشمه های مورد استفاده در این پژوهش

چشمه	اکتیویته در زمان ساخت	نیمه عمر	اکتیویته در زمان انجام پژوهش
Co-۶۰	۵ μ Ci	۵.۲۷۱۴ year	۰.۶۰۹ μ Ci
Cs-۱۳۷	۵ μ Ci	۳۰.۰ year	۳.۵۴ μ Ci

همچنین تابش های زمینه به شکل یک چشمه همسانگرد با توزیع یکنواخت در حجم مورد نظر تعریف می شوند. با تعریف شار یکنواخت ذرات درون یک حجم، قدرت چشمه می بایستی دوباره نرمال شود تا شار ۱ ذره بر سانتیمتر مربع-ثانیه به دست آید. برای این کار بایستی از کارت wgt در کارت SDEF استفاده کرد. برای تعریف نوع ذره در کارت SDEF می بایست در مقابل پارامتر par، هم چشمه استاندارد و هم تابش زمینه به همراه درصد نسبی تابش هر کدام تعریف شود. به منظور محاسبه درصد نسبی تابش از روابط ۱ استفاده می شود که این روابط با استفاده از مدارک چاپ شده ۶MCNP به دست آمده است [۶].

$$(۱) \quad \%f_{source} = \frac{I_{source}^{SA}}{I_{bg}^{SD} + I_{source}} \quad \square \quad \%f_{bg} = \frac{I_{bg}^{SA}}{I_{bg}^{SD} + I_{source}}$$

در روابط بالا I_{source} و I_{bg} به ترتیب شدت تابش های چشمه و پرتوهای زمینه بر حسب شمارش بر ثانیه، SA مساحت مربوط به حجم مورد نظر و SD به توجه به هندسه مورد نظر تعیین شده که برای یک مکعب حدود ۳.۷، برای یک استوانه حدود ۳.۴ و برای یک کره حدود ۳.۰ می باشد.

در کد MCNP برای در نظر گرفتن پهنای پیک در نیمه ارتفاع یا $FWHM^{۱۲۵}$ در طیف خروجی نیاز به تعریف سه ضریب a، b و c است به گونه ای که FWHM طبق رابطه ۲ تابعی از انرژی خواهد بود [۷]:

^{۱۲۵} Full Width at Half Maximum



$$(۲) \quad FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2$$

این سه ضریب به عنوان ورودی کارت geb در مقابل کارت FTn وارد می شوند و از جمله اطلاعات مورد نیاز در مورد کارت FTn phl هستند. برای محاسبه این سه ضریب با استفاده از نتایج تجربی، FWHM مربوط به پیک های موجود در طیف خروجی تجربی در انرژی های مختلف تعیین شده و پس از آن از طریق برازش منحنی در نرم افزار MATLAB این ضرایب برای ورودی کد تعیین گردید. در جدول ۲ نتایج این محاسبات آمده است.

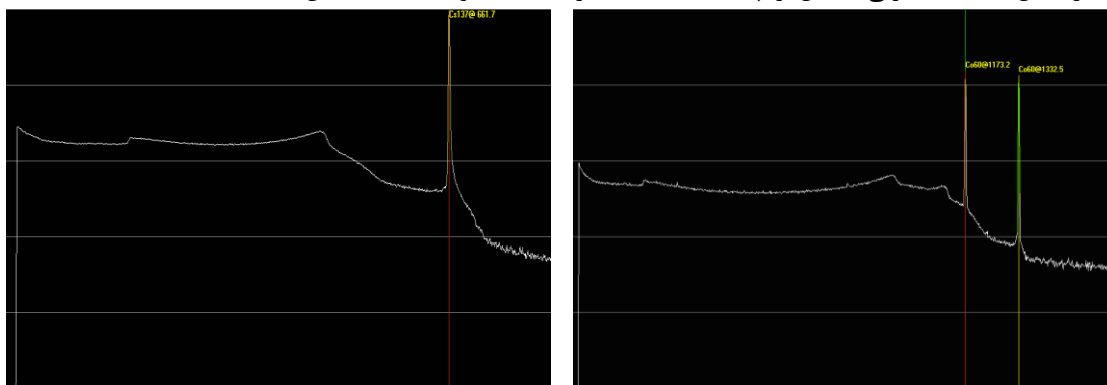
جدول ۲: پارامترهای تعیین کننده FWHM در کد MCNP محاسبه شده از طریق برازش منحنی بر داده های تجربی

c (MeV ^{-۱})	b (MeV ^{۱/۲})	a (MeV)	پارامترهای تعیین کننده FWHM در کد MCNP
۱۵.۶۱	۰.۰۰۰۱۹۲ ۸	۰.۰۰۱۰۴ ۸	مقادیر در نظر گرفته شده در فایل ورودی

پس از انجام شبیه سازی و تحلیل خروجی، داده های حاصل شده به همراه داده های تجربی به منظور مقایسه بهتر در نرم افزار MATLAB رسم گردید. لازم به ذکر است که محاسبات MCNP به ازاء یک ذره است و در نهایت برای مقایسه با طیف تجربی نتایج می بایستی در قدرت چشمه و مدت زمان طیف نگاری ضرب شود.

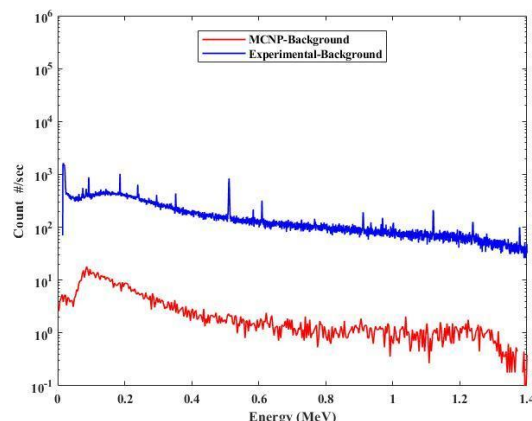
نتایج:

در شکل ۲ طیف تجربی حاصل از چشمه های استاندارد ۶۰-Co و ۱۳۷-Cs نشان داده شده است.



شکل (۲) طیف تجربی حاصل از چشمه های استاندارد ۶۰-Co (سمت راست) و ۱۳۷-Cs (سمت چپ)

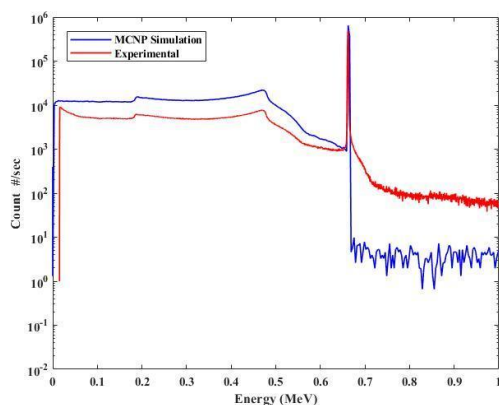
در شکل ۳ طیف خروجی MCNP مربوط به تابش زمینه در غیاب چشمه استاندارد نشان داده شده و با طیف تابش زمینه حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه شده است.



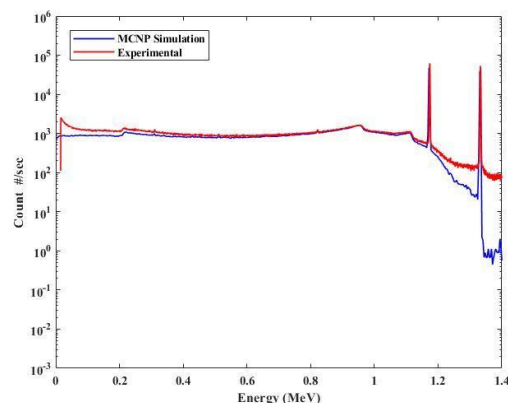
شکل (۳) مقایسه طیف تابش زمینه حاصل از آزمایشات تجربی و شبیه سازی MCNP

همانطور که مشاهده می شود طیف زمینه شبیه سازی پایین تر از طیف تجربی است که این امر می تواند ناشی از حضور چشمه های کالیبراسیون و یا سایر منابع آلودگی پرتویی در آزمایشگاه طیف نگاری و عدم در نظر گرفتن آنها در شبیه سازی این پژوهش باشد. اگرچه حین طیف نگاری آشکارساز درون حفاظ قرار می گیرد ولیکن تابش زمینه ناشی از این منابع همچنان در طیف زمینه تجربی دیده خواهد شد. لازم به ذکر است از آنجاییکه نتایج محاسبات MCNP به ازای یک ذره است به منظور مقایسه طیف تجربی و طیف شبیه سازی شده، نتایج MCNP در کل شمارش زمینه که با استفاده شمارش کل طیف نگار در آزمایشات تجربی به دست می آید ضرب شده است.

در شکل ۴ و ۵ طیف خروجی MCNP در حضور تابش زمینه مربوط به چشمه های استاندارد ^{60}Co و ^{137}Cs در مقایسه با طیف تجربی آن نشان داده شده است.



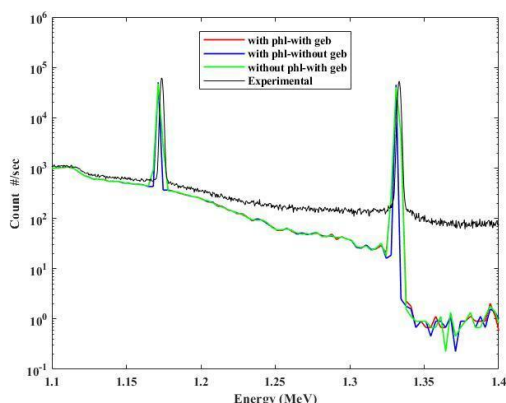
به همراه MCNP شکل (۵) طیف خروجی ^{137}Cs طیف تجربی مربوط به به چشمه استاندارد



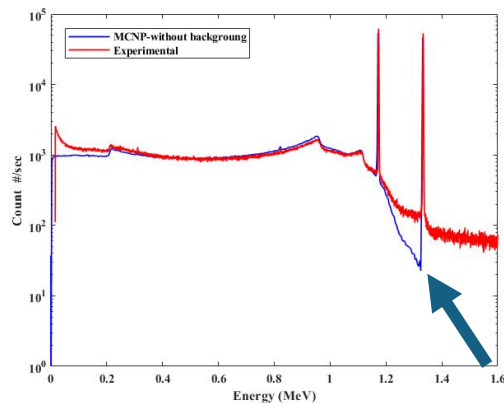
به MCNP شکل (۴) طیف خروجی همراه طیف تجربی مربوط به چشمه استاندارد ^{60}Co



همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد دو طیف تطابق خوبی با یکدیگر داشته و پیک های مربوط به فوتون های ۱.۱۷ MeV و ۱.۳۳ MeV و همچنین لبه کامپتون هر دو پیک به همراه پیوستار کامپتون به خوبی در طیف حاصل از شبیه سازی قابل مشاهده است. همین امر در مورد شکل ۵ و طیف حاصل از ^{137}Cs صادق است.



در سه حالت: شبیه سازی با ^{60}Co شکل (۷) طیف ولیکن phl شبیه سازی با در نظرگرفتن geb و phl نظرگرفتن geb، ولیکن با phl شبیه سازی بدون در نظرگرفتن geb، نتایج تجربی



در مقایسه با طیف ^{60}Co شکل (۶) طیف تجربی بدون در نظر گرفتن تابش های MCNP خروجی زمینه

در شکل ۶ مقایسه طیف خروجی MCNP در حضور تابش های زمینه و همچنین بدون در نظر گرفتن تابش های زمینه نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود چنانچه شبیه سازی بدون در نظرگرفتن طیف زمینه صورت گیرد در انرژی های بالاتر از انرژی چشمه استاندارد، شمارش صفر شده و لذا در نظرگرفتن تابش های زمینه باعث شده که طیف حاصل از شبیه سازی از لحاظ شکل کلی به طیف تجربی نزدیک تر باشد.

در شکل ۷ اثر در نظر گرفتن قابلیت phl در تالی ^{18}F در مورد شکل پیک نشان داده شده است. در این شکل نتایج مربوط به چهار حالت (الف) شبیه سازی با در نظرگرفتن phl و وارد کردن داده های مناسب geb (ب) شبیه سازی با در نظرگرفتن phl ولیکن بدون وارد کردن geb (ج) شبیه سازی بدون در نظرگرفتن phl ولیکن با وارد کردن داده های مناسب geb (د) داده های تجربی قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج شبیه سازی، مکان قرار گیری پیک ها و FWHM آنها محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه گردید. داده های این محاسبات در جدول ۳ به اختصار آمده است.

جدول ۳: مقایسه نتایج مربوط به مکان قرار گیری پیک ها و FWHM آنها حاصله از شبیه سازی و آزمایشات تجربی

FWHM _{MCNP} (keV)	FWHM _{exp} (keV)	Peak _{MCNP} (keV)	Peak _{exp} (keV)	چشمه پرتوزا
۱.۵۷۶	۱.۷۷۷	۶۶۲.۲۳	۶۶۱.۹۵۳	Cs-137
۱.۹۶۴	۱.۹۷۶	۱۱۷۱.۴	۱۱۷۳.۸۸۶	Co-60
۲.۰۸۶	۲.۰۷۱	۱۳۳۱.۱	۱۳۳۳.۳۲۸	Co-60



۳- بحث و نتیجه گیری:

با توجه به نتایج حاصل شده و مقایسه آنها با نتایج تجربی، استفاده از تابش های زمینه به عنوان چشمه در شبیه سازی سیستم طیف نگاری، اثر قابل ملاحظه ای در شکل کلی طیف خروجی و تطابق آن با داده های تجربی داشته است. همچنین استفاده از قابلیت phl به همراه تعریف صحیح geb در کارت FTn در مورد تالی ^{18}F در MCNP در شکل پیک های موجود در طیف مؤثر بوده است. نمودارها حاکی از نزدیکی نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی بوده و لذا پیشنهاد می گردد در کاربردهایی که طیف زمینه بر نتایج تا حدودی اثر گذار است از این قابلیت MCNP استفاده گردد لیکن این مهم را بایستی در نظر گرفت که برای حصول نتایج قابل اعتماد می بایستی تعداد ذرات شبیه سازی شده به اندازه کافی بزرگ باشد.

۴- مراجع:

- [۱] Haj-Heidari, M. T., Safari, M. J., Afarideh, H., & Rouhi, H. (۲۰۱۶). Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes. *Radiation Measurements*, ۸۸, ۱-۶.
- [۲] Conti, C. C., Salinas, I. C. P., & Zylberberg, H. (۲۰۱۳). A detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP^۵. *Progress in Nuclear Energy*, ۶۶, ۳۵-۴۰.
- [۳] Sima, O., & Arnold, D. (۲۰۰۹). On the Monte Carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems. *Applied radiation and isotopes*, ۶۷(۵), ۷۰۱-۷۰۵
- [۴] Goorley, T., James, M., Booth, T., Brown, F., Bull, J., Cox, L. J., ... & Zukaitis, T. (۲۰۱۴). Features of MCNP^۶. In SNA+ MC ۲۰۱۳-joint international conference on supercomputing in nuclear applications+ Monte Carlo (p. ۰۶۰۱۱). EDP Sciences.
- [۵] Zamani, Eliyeh, et al. "Developing software for self-absorption correction for gamma spectrometry of soil and water samples based on MCNP^۵ monte carlo simulations." *Scientific Research Journal* ۱۷,۲ (۲۰۲۰): ۱۳-۳۲.
- [۶] Fensin, M. L., & McKinney, G. W. (۲۰۱۳). How to use the MCNP^۶ Background Source Capability. In ۲۰۱۳ ANS Winter Meeting, Washington, LA-UR-۱۳-۲۳۳۴۴.
- [۷] Goorley, J. T., James, M. R., Booth, T. E., Brown, F. B., Bull, J. S., Cox, L. J., ... & Johns, R. C. (۲۰۱۳). Initial MCNP^۶ Release Overview-MCNP^۶ version ۱,۰, LA-UR-۱۳-۲۲۹۳۴. Los Alamos National Laboratory, ۴۳.



مدرج‌سازی مجازی سیستم شمارشگر تمام بدن با استفاده از کتابخانه‌ای از فانتوم‌های آماری (کد مقاله: ۱۴۸۹)

رفعت متولی، لاله^۱ - حسینیان ازغدی، علییه^۱ - میری حکیم آباد، سیدهاشم^۱
^۱ - دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

یکی از کاربردهای مهم آشکارسازهای موسوم به شمارنده‌های تمام بدن، در سوانح هسته‌ای است، جایی که احتمال آلودگی پرتوزا برای طیف وسیعی از افراد وجود دارد. در چنین شرایطی، نیاز به ابزارهایی است که بتوانند افراد آلوده را به سرعت و با دقت بالا پایش کنند. در این مطالعه، مدرج‌سازی مجازی یک سیستم شمارنده تمام بدن با استفاده از کتابخانه‌ای شامل ۱۰۰ فانتوم آماری انجام شد و بازده شمارش (Counting Efficiency) به عنوان تابعی از زمان پس از دریافت رادیونوکلیید یید-۱۳۱ با استفاده از روش مونت کارلو محاسبه گردید. محاسبات مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX نسخه ۲.۶ انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از فانتوم‌های آماری در فرآیند مدرج‌سازی مجازی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا بازده شمارش برای یید-۱۳۱ تابع ساده‌ای از قد، وزن، شاخص توده بدنی (BMI) یا سایر متغیرهای مورفومتریک نیست. در عوض، بازده شمارش به شدت به موقعیت هندسی تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. بررسی همبستگی بین بازده شمارش و این پارامترها یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه است. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود دقت و سرعت اندازه‌گیری پرتوزایی یید-۱۳۱ در افراد آلوده کمک کند و به عنوان ابزاری مؤثر در آمادگی برای مقابله با سوانح هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فانتوم‌های آماری، مونت کارلو، مدرج‌سازی مجازی، بازده شمارش

Virtual calibration of whole-body counter using a library of statistical phantoms

Rafat-Motavalli, Laleh ^{۱*}, Hoseinian-Azghadi, Elie ^۱, Miri-Hakimabad, Hashem ^۱

^۱ - Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Science, Department of Physics

Abstract:

One of the important applications of whole-body counters is in nuclear accidents, where there is a risk of radioactive contamination for a large number of individuals. In such situations, fast detectors are needed to quickly and accurately monitor contaminated individuals. In this study, the virtual calibration of a whole-body counting system was performed using a library of ۱۰۰ statistical phantoms, and the counting efficiency (CE) was calculated as a function of time after the intake of the radionuclide iodine-¹³¹I (¹³¹I) using the Monte Carlo method. The Monte Carlo calculations were carried out using the MCNPX version ۲.۶ code. The results of this study demonstrate the significant importance of using statistical phantoms in the virtual calibration process, as the counting efficiency for ¹³¹I is not a simple function of height, weight, body mass index (BMI), or other morphometric variables. Instead, the counting efficiency is highly dependent on the geometric location of the thyroid and the thickness of soft tissue between the thyroid and the detectors. Investigating the correlation between counting



efficiency and these parameters is one of the key findings of this study. Therefore, the results of this research can help improve the accuracy and speed of measuring ^{131}I radioactivity in contaminated individuals and serve as an effective tool for preparedness in nuclear accident response.

Key words: Statistical Phantoms, Monte Carlo, Dosimetry, Virtual Calibration, Counting Efficiency

۱- مقدمه:

سوانح هسته‌ای، چه ناشی از حوادث نیروگاه‌های هسته‌ای، انفجارهای هسته‌ای یا حوادث مرتبط با مواد پرتوزا، می‌توانند پیامدهای جدی برای سلامت عمومی و محیط زیست به همراه داشته باشند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در چنین شرایطی، پایش سریع و دقیق افراد آلوده به مواد پرتوزا است. در این مواقع، زمان عامل تعیین‌کننده‌ای است، زیرا هرچه سریع‌تر بتوان افراد آلوده را شناسایی و میزان پرتوایی بدن آن‌ها را اندازه‌گیری کرد، اقدامات درمانی و حفاظتی مؤثرتری می‌توان انجام داد. این اقدامات شامل تجویز داروهای مناسب (مانند یدید پتاسیم برای جلوگیری از جذب ید رادیواکتیو توسط تیروئید)، محدود کردن تماس افراد با محیط آلوده و جلوگیری از گسترش بیشتر آلودگی است.

در سوانح هسته‌ای، رادیونوکلئیدهای مختلفی ممکن است در محیط پخش شوند، اما برخی از آن‌ها به دلیل نیمه‌عمر کوتاه، پرتوایی بالا و تمایل به تجمع در اندام‌های خاص بدن، خطر بیشتری برای سلامت انسان دارند. یکی از مهم‌ترین این رادیونوکلئیدها، ید-۱۳۱ (I^{131}) است. ید-۱۳۱ به دلیل نیمه‌عمر نسبتاً کوتاه (حدود ۸ روز) و تمایل به تجمع در غده تیروئید، یکی از عوامل اصلی دز پرتوی دریافتی توسط افراد در معرض آلودگی است. در واقع، بیش از ۹۵ درصد از دز پرتوی ناشی از آلودگی پرتوزا در بدن افراد آلوده، به دلیل جذب ید-۱۳۱ توسط تیروئید است. بنابراین، پایش دقیق و سریع این رادیونوکلئید در بدن افراد آلوده، از اهمیت بالایی برخوردار است.

برای پایش افراد آلوده به مواد پرتوزا، ابزارهای مختلفی وجود دارد که یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین آن‌ها، شمارنده‌های تمام بدن (Whole-Body Counters یا WBC) هستند. شمارنده‌های تمام بدن، دستگاه‌هایی هستند که قادرند پرتوهای گامای ساطع‌شده از رادیونوکلئیدهای موجود در بدن فرد را تشخیص داده و اندازه‌گیری کنند. این دستگاه‌ها معمولاً از آشکارسازهای سدیم یدید (NaI) یا ژرمانیوم فوق خالص (HPGe) استفاده می‌کنند و می‌توانند اسکن کامل بدن فرد را در مدت زمان کوتاهی (معمولاً حدود ۲ دقیقه) انجام دهند. این ویژگی باعث می‌شود که شمارنده‌های تمام بدن به ابزاری ایده‌آل برای پایش سریع تعداد زیادی از افراد در شرایط اضطراری تبدیل شوند.

با این حال، نکته کلیدی در استفاده از شمارنده‌های تمام بدن، توانایی تبدیل داده‌های خام (یعنی تعداد شمارش‌های ثبت‌شده توسط آشکارساز) به مقدار دقیق پرتوایی موجود در بدن فرد است. این فرآیند، که به آن مدرج‌سازی گفته می‌شود، نیازمند در نظر گرفتن عوامل متعددی است، از جمله ویژگی‌های فیزیکی فرد (مانند قد، وزن و توزیع چربی و عضلات)، موقعیت اندام‌های داخلی (به ویژه تیروئید در مورد ید-۱۳۱) و تأثیرات جذب و پراکندگی پرتوهای گاما در بافت‌های بدن. هرگونه خطا در این فرآیند می‌تواند به تخمین نادرست پرتوایی بدن فرد منجر شود و در نتیجه، اقدامات درمانی و حفاظتی نامناسبی را به همراه داشته باشد.

یکی از چالش‌های اصلی در مدرج‌سازی شمارنده‌های تمام بدن، تنوع گسترده در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیکی افراد است. افراد از نظر قد، وزن، توزیع چربی و عضلات، و موقعیت اندام‌های داخلی (مانند تیروئید) با یکدیگر تفاوت‌های قابل توجهی دارند. این تفاوت‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر بازده شمارش (Counting Efficiency) داشته باشند، یعنی نسبت بین تعداد پرتوهای گامای ثبت‌شده توسط آشکارساز و مقدار واقعی پرتوایی موجود در بدن فرد. برای مثال، ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها می‌تواند به طور قابل توجهی بر میزان پرتوهای گامای رسیده به آشکارساز تأثیر بگذارد. بنابراین، استفاده از



مدل‌های ساده‌شده یا فانتوم‌های استاندارد (مانند فانتوم‌های مرجع ICRP) ممکن است به تخمین‌های نادرست منجر شود، به ویژه در مورد رادیونوکلئیدهایی مانند ید-۱۳۱ که در اندام‌های خاصی تجمع می‌کنند.

برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از فانتوم‌های آماری در فرآیند مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن پیشنهاد شده است [۱]. فانتوم‌های آماری، مدل‌های سه‌بعدی از بدن انسان هستند که بر اساس داده‌های آماری از جمعیت‌های مختلف ساخته می‌شوند و تنوع گسترده‌ای در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیک را در بر می‌گیرند. این فانتوم‌ها نه تنها تفاوت‌های در قد و وزن، بلکه تغییرات در موقعیت و اندازه اندام‌های داخلی (مانند تیروئید) را نیز در نظر می‌گیرند [۲]. با استفاده از این فانتوم‌ها، می‌توان بازده شمارش را برای افراد با ویژگی‌های مختلف به دقت محاسبه کرد و در نتیجه، تخمین دقیق‌تری از پرتوآبایی بدن فرد به دست آورد [۳].

در این مطالعه، از کتابخانه‌ای شامل ۱۰۰ فانتوم آماری برای مدرج‌سازی مجازی یک شمارنده تمام بدن استفاده شده است. این فانتوم‌ها شامل مردان و زنان بالغ با طیف وسیعی از قد، وزن و ویژگی‌های آناتومیک هستند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری در مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌های پرتوآبایی در افراد آلوده کمک کند.

در نهایت، پایش سریع و دقیق افراد آلوده به مواد پرتوزا در سوانح هسته‌ای، یکی از اولویت‌های اصلی در مدیریت چنین حوادثی است. شمارنده‌های تمام بدن به دلیل سرعت و دقت بالا، ابزاری کلیدی در این زمینه هستند. با این حال، مدرج‌سازی دقیق این دستگاه‌ها، به ویژه برای رادیونوکلئیدهای مهمی مانند ید-۱۳۱، نیازمند در نظر گرفتن تنوع گسترده در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیک افراد است. استفاده از فانتوم‌های آماری در فرآیند مدرج‌سازی مجازی، می‌تواند به بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها کمک کند و در نتیجه، اقدامات درمانی و حفاظتی مؤثرتری را در شرایط اضطراری امکان‌پذیر سازد. این مطالعه گامی مهم در جهت افزایش آمادگی برای مقابله با سوانح هسته‌ای و کاهش پیامدهای آن بر سلامت عمومی است.

۲- روش کار:

۲-۱- شبیه‌سازی فانتوم‌های آماری درون شمارشگر تمام بدن

در این بخش، یک کتابخانه شامل ۱۰۰ فانتوم آماری ساخته شد. این فانتوم‌ها بر اساس داده‌های آماری از جمعیت‌های مختلف طراحی شده‌اند و تنوع گسترده‌ای در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیک، از جمله قد، وزن، توزیع چربی و عضلات، و موقعیت اندام‌های داخلی (مانند تیروئید) را در بر می‌گیرند. فانتوم‌ها به صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش‌های مدل‌سازی هندسی پیشرفته ایجاد شدند تا بتوانند ساختار پیچیده بدن انسان را به دقت شبیه‌سازی کنند.

برای شبیه‌سازی فانتوم‌ها درون شمارشگر تمام بدن، از یک سیستم FASTSCAN WBC (ساخته‌شده توسط شرکت Canberra Inc., USA) استفاده شد [۴]. این سیستم مجهز به دو آشکارساز سدیم یدید (NaI) است که قادر به تشخیص پرتوهای گامای ساطع‌شده از رادیونوکلئیدهای موجود در بدن هستند. شبیه‌سازی شمارشگر تمام بدن و فانتوم‌های آماری درون آن با استفاده از کد محاسباتی MCNPX نسخه ۲.۶ انجام شد. این کد بر اساس روش مونت‌کارلو کار می‌کند و قادر است برهم‌کنش پرتوهای گاما با بافت‌های بدن و آشکارسازها را به دقت مدل‌سازی کند.

در این شبیه‌سازی، موقعیت فانتوم‌ها نسبت به آشکارسازها، ضخامت بافت‌های نرم بین تیروئید و آشکارسازها، و سایر پارامترهای هندسی به دقت در نظر گرفته شدند تا بازده شمارش به طور واقع‌گرایانه‌ای محاسبه شود.



۲-۲- بیوکینتیک آلودگی پرتوی در بدن

در این بخش، مدل بیوکینتیک رادیونوکلئید ید-۱۳۱ (^{131}I) در بدن انسان توسعه داده شد. مدل بیوکینتیک توصیف می‌کند که چگونه یک رادیونوکلئید پس از ورود به بدن (از طریق استنشاق، بلع یا جذب پوستی) در اندام‌ها و بافت‌های مختلف توزیع شده و با گذشت زمان دچار واپاشی یا دفع می‌شود. برای مدل‌سازی بیوکینتیک ید-۱۳۱، از ترکیب دو مدل استفاده شد:

مدل دستگاه تنفسی انسان (HRTM): این مدل از انتشارات ICRP ۱۳۰ گرفته شده است [۵] و نحوه توزیع و جذب رادیونوکلئیدها در دستگاه تنفسی را توصیف می‌کند. در این مطالعه، مدل HRTM برای شبیه‌سازی استنشاق ید-۱۳۱ به شکل بخار (I_2)، متیل ید (CH_3I) و آئروسول‌ها با قطر آئرودینامیکی متوسط (AMAD) ۱ و ۵ میکرومتر استفاده شد.

مدل بیوکینتیک ید توسعه‌یافته توسط لگت: این مدل نحوه جذب، توزیع و دفع ید در بدن، به ویژه در غده تیروئید را توصیف می‌کند. این مدل برای شبیه‌سازی رفتار ید-۱۳۱ در بدن و محاسبه فعالیت آن در اندام‌های مختلف (مانند تیروئید، خون و سایر بافت‌ها) به کار گرفته شد [۶].

با ترکیب این دو مدل، منحنی‌های فعالیت ید-۱۳۱ در اندام‌های مختلف به عنوان تابعی از زمان پس از مصرف محاسبه شد. این منحنی‌ها برای شرایط مختلف، از جمله تیروئید باز و مسدود شده، نرخ‌های تنفسی متفاوت و مدت‌های تماس با آلودگی، به دست آمد.

۳-۲- ارزیابی بازده شمارش

در این بخش، بازده شمارش (Counting Efficiency یا CE) برای رادیونوکلئید ید-۱۳۱ به عنوان تابعی از زمان پس از مصرف محاسبه شد. بازده شمارش به معنای نسبت بین تعداد پرتوهای گامای ثبت‌شده توسط آشکارسازها و مقدار واقعی پرتوایی موجود در بدن فرد است. برای محاسبه بازده شمارش، از دو مفهوم استفاده شد: بازده شمارش ویژه اندام (Organ Specific Counting Efficiency یا OSCE): این بازده برای هر یک از ۱۵ ناحیه چشمه (Source Regions) در بدن، از جمله تیروئید، ریه‌ها، خون و سایر بافت‌ها، به طور جداگانه محاسبه شد. OSCE نشان می‌دهد که هر اندام تا چه اندازه در بازده شمارش کل مشارکت دارد. بازده شمارش کل (Total Counting Efficiency): این بازده با جمع‌زدن بازده‌های شمارش ویژه اندام، وزن‌دار شده توسط فعالیت هر اندام، به دست آمد. به عبارت دیگر، بازده شمارش کل به صورت زیر محاسبه شد:

$$\varepsilon_{Total} = \sum A_S(t) \times \varepsilon_S$$

که در آن:

A_S پرتوایی ناحیه چشمه S در زمان t است

ε_S بازده شمارش ویژه اندام S است

برای ارزیابی بازده شمارش، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو برای هر یک از فانتوم‌های آماری انجام شد و بازده شمارش ویژه اندام و بازده شمارش کل به عنوان تابعی از زمان پس از مصرف ید-۱۳۱ محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بازده شمارش کل به شدت به موقعیت هندسی تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. همچنین، مشخص شد که پس از ۲ روز از مصرف ید-۱۳۱، تیروئید سهم عمده‌ای در بازده شمارش کل دارد.



این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی فانتوم‌های آماری درون شمارشگر تمام بدن، مدل‌سازی بیوکینتیک ید-۱۳۱ و ارزیابی بازده شمارش، گامی مهم در جهت بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌های پرتوزایی در افراد آلوده برداشته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از فانتوم‌های آماری و مدل‌های بیوکینتیک پیشرفته می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در مدرج‌سازی شمارنده‌های تمام بدن کمک کند و در نتیجه، اقدامات درمانی و حفاظتی مؤثرتری را در شرایط اضطراری امکان‌پذیر سازد.

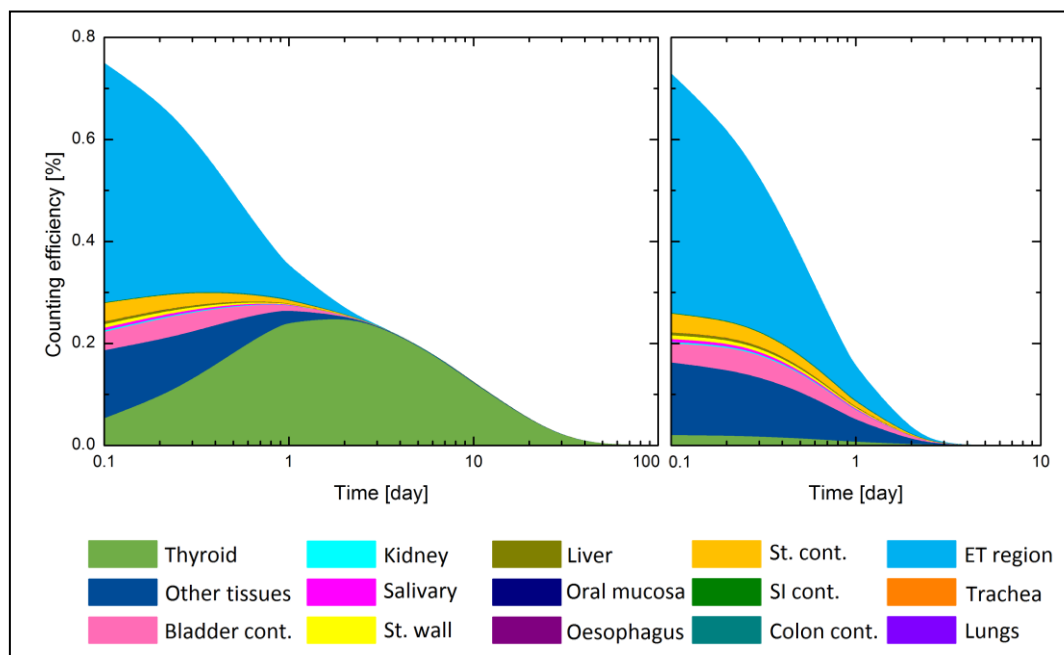
۳- نتایج:

این مطالعه به بررسی بازده شمارش (Counting Efficiency) برای رادیونوکلئید ید-۱۳۱ (^{131}I) در یک سیستم شمارنده تمام بدن (WBC) پرداخته است. نتایج به دو بخش اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) بازده شمارش کل و ویژه اندام برای فانتوم مرجع، و (۲) بازده شمارش کل برای کتابخانه فانتوم‌های آماری. علاوه بر این، همبستگی بین بازده شمارش کل و پارامترهای مورفومتریک نیز بررسی شده است.

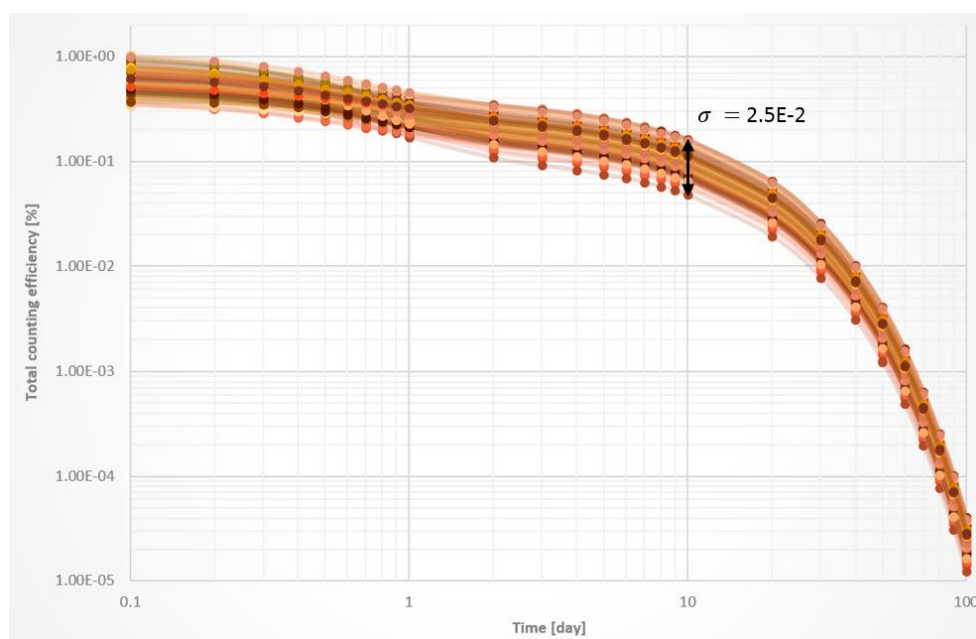
۳-۱- بازده شمارش کل و ویژه اندام برای فانتوم مرجع

در این بخش، بازده شمارش کل و ویژه اندام (Organ Specific Counting Efficiency یا OSCE) برای فانتوم مرجع مرد بالغ ICRP محاسبه شد. شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو برای ۱۵ منطقه منبع (Source Regions) مختلف در بدن، از جمله تیروئید، ریه‌ها، خون و سایر بافت‌ها، انجام شد. بازده شمارش ویژه اندام برای هر منطقه منبع به طور جداگانه محاسبه گردید و سپس بازده شمارش کل با جمع‌زدن بازده‌های ویژه اندام وزندار شده توسط فعالیت هر اندام به دست آمد.

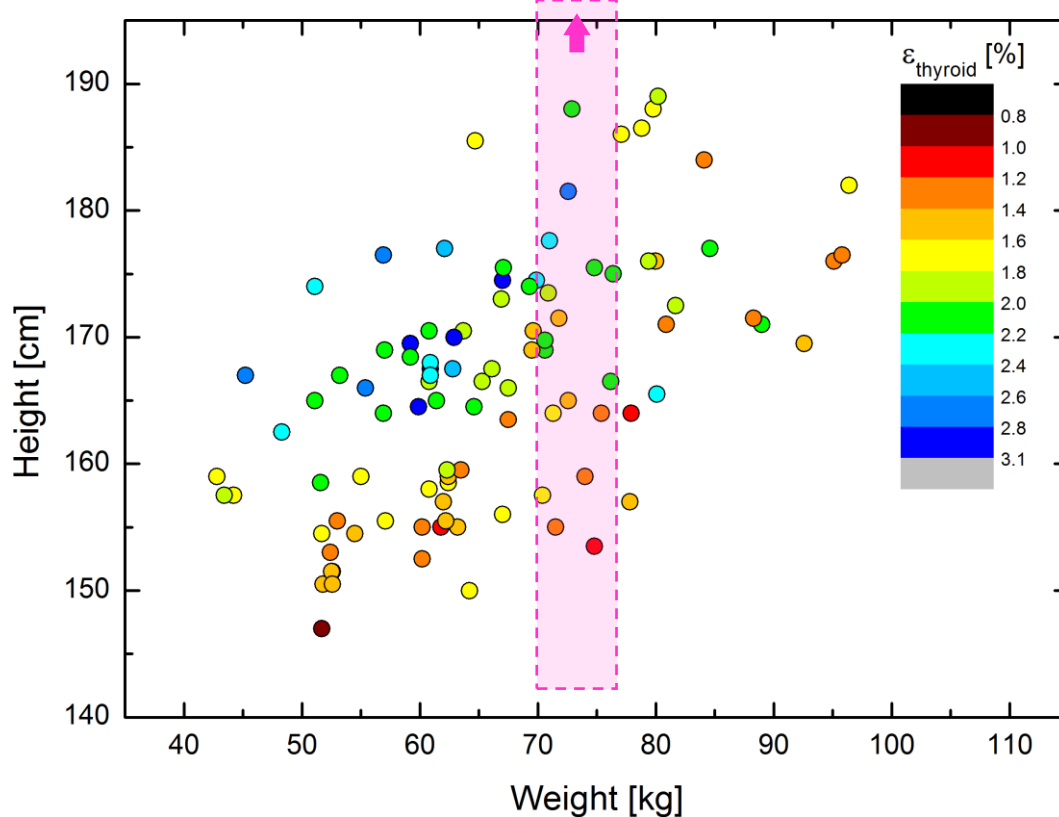
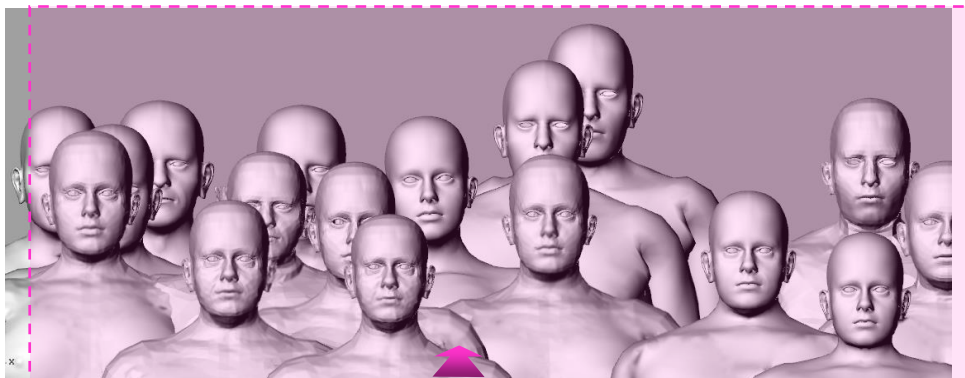
نتایج نشان داد که پس از ۲ روز از مصرف ید-۱۳۱، تیروئید سهم عمده‌ای در بازده شمارش کل دارد. در شکل ۱، بازده شمارش کل به عنوان تابعی از زمان پس از استنشاق آئروسول‌های ید-۱۳۱ با قطر آئرودینامیکی متوسط (AMAD) ۱ میکرومتر برای فانتوم مرجع نشان داده شده است. در حالت تیروئید باز یا غیرمسدود (Unblocked Thyroid)، تیروئید پس از ۲ روز به عنوان عامل اصلی در بازده شمارش کل ظاهر می‌شود. این نشان می‌دهد که در این شرایط، تیروئید می‌تواند به تنهایی برای تخمین بازده شمارش کل در نظر گرفته شود. در مقابل، در حالت تیروئید مسدود شده (Blocked Thyroid)، بازده شمارش کل پس از ۲ روز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، زیرا تیروئید قادر به جذب ید-۱۳۱ نیست.



شکل (۱) مقدار بازده کل برای فانتوم مرجع به صورت تابعی از زمان پس از دریافت آلودگی پرتوزا ید-۱۳۱ با AMAD برابر با ۱ میکرومتر برای (a) تیروئید غیر مسدود و (b) تیروئید مسدود



شکل (۲) بازده شمارش کل به عنوان تابعی از زمان پس از دریافت آلودگی پرتوزای ید-۱۳۱ با AMAD برابر با ۱ میکرومتر برای کتابخانه فانتوم‌های آماری.



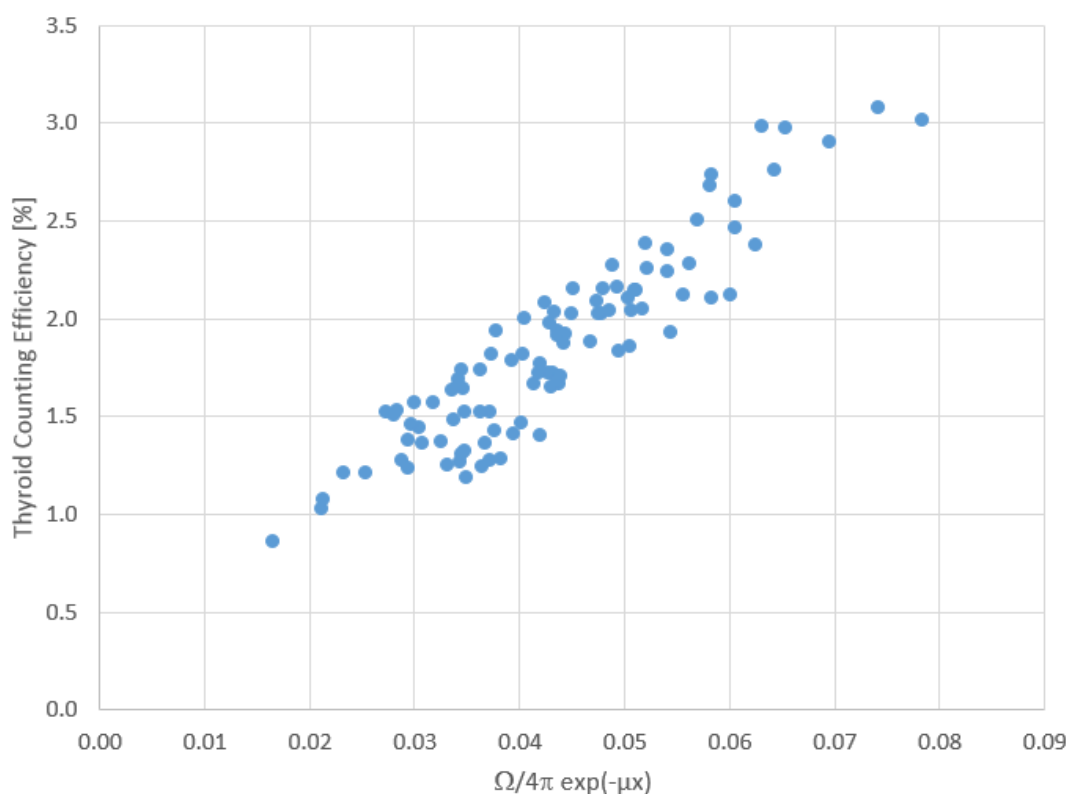
شکل (۳) نمودار پراکندگی داده‌های قد برحسب وزن فانتوم. علائم با رنگی پر شده اند که متناسب با بازده تیروئید (درصد) است.

۳-۲- بازده شمارش کل برای کتابخانه فانتوم‌های آماری

در این بخش، بازده شمارش کل برای کتابخانه‌ای شامل ۱۰۰ فانتوم آماری محاسبه شد. این فانتوم‌ها شامل مردان و زنان بالغ با طیف وسیعی از قد، وزن و ویژگی‌های آناتومیک بودند. بازده شمارش کل به عنوان تابعی از زمان پس از مصرف ید-۱۳۱ برای هر یک از فانتوم‌ها محاسبه گردید. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده‌است، که در آن بازده شمارش کل برای تمام فانتوم‌ها به صورت منحنی‌های جداگانه ترسیم شده‌اند.



بررسی نتایج نشان داد که بازده شمارش کل برای فانتوم‌های مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است. این تفاوت‌ها ناشی از تنوع در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیکی افراد، از جمله موقعیت تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها، است. برای مثال، فانتوم‌هایی با تیروئید نزدیک‌تر به آشکارسازها و ضخامت کمتر بافت نرم، بازده شمارش بالاتری داشتند.



شکل (۴) همبستگی مشاهده شده بین بازده کل تیروئید و حاصلضرب زاویه فضایی مشاهده آشکارسازها در ضریب تضعیف برای آلودگی پرتوزای ید-۱۳۱ با AMAD برابر با ۱ میکرومتر

۳-۳- بررسی همبستگی بازده شمارش کل با پارامترهای مورفومتریکی

در این بخش، همبستگی بین بازده شمارش کل و پارامترهای مورفومتریکی مختلف، از جمله قد، وزن، شاخص توده بدنی (BMI) و جرم تیروئید، بررسی شد. نتایج نشان داد که بازده شمارش کل برای ید-۱۳۱ تابع ساده‌ای از این پارامترها نیست. برای مثال، در شکل ۳، نمودار پراکندگی وزن در مقابل قد فانتوم‌ها نشان داده شده است، که در آن رنگ هر نقطه نشان‌دهنده بازده شمارش تیروئید است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ الگوی واضحی بین بازده شمارش تیروئید و قد یا وزن وجود ندارد.

با این حال، بررسی‌های بیشتر نشان داد که بازده شمارش تیروئید به شدت به موقعیت هندسی تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. برای کمی‌سازی این وابستگی، زاویه جامد (Ω) آشکارسازها از مرکز جرم تیروئید محاسبه شد و در ضریب تضعیف ($\exp(-\mu x)$) ضرب گردید، که در آن x ضخامت بافت نرم و μ ضریب تضعیف بافت نرم برای انرژی ۰/۳۶۵ مگاالکترون‌ولت است. در شکل ۴، همبستگی بین بازده شمارش تیروئید و این پارامتر ($\Omega \times \exp(-\mu x)$) نشان داده



شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که این پارامتر می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب برای پیش‌بینی بازده شمارش تیروئید استفاده شود.

به عنوان جمع بندی می‌توان گفت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بازده شمارش کل برای ید-۱۳۱ به شدت به موقعیت تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. استفاده از فانتوم‌های آماری و مدل‌سازی دقیق بیوکینتیک ید-۱۳۱ می‌تواند به بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌های پرتوژی در افراد آلوده کمک کند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری در مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در تخمین پرتوژی بدن افراد آلوده کمک کند.

۴- بحث و نتیجه گیری:

این مطالعه به بررسی بازده شمارش (Counting Efficiency) برای رادیونوکلئید ید-۱۳۱ (I^{131}) در یک سیستم شمارنده تمام بدن (WBC) پرداخته است. با استفاده از کتابخانه‌ای شامل ۱۰۰ فانتوم آماری، مدل‌سازی بیوکینتیک پیشرفته و شبیه‌سازی‌های مونت کارلو، بازده شمارش کل و ویژه اندام (Organ Specific Counting Efficiency یا OSCE) به عنوان تابعی از زمان پس از مصرف ید-۱۳۱ محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بازده شمارش کل برای ید-۱۳۱ به شدت به موقعیت هندسی تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. این یافته‌ها اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری در فرآیند مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن را برجسته می‌کند.

۴-۱- وابستگی بازده شمارش به موقعیت تیروئید و ضخامت بافت نرم

نتایج نشان داد که بازده شمارش کل برای ید-۱۳۱ تابع ساده‌ای از قد، وزن یا شاخص توده بدنی (BMI) نیست. در عوض، بازده شمارش به شدت به موقعیت تیروئید و ضخامت بافت نرم بین تیروئید و آشکارسازها وابسته است. این یافته‌ها با مطالعات قبلی همسو است که نشان می‌دهند ویژگی‌های آناتومیک فردی، به ویژه موقعیت اندام‌های داخلی، تأثیر قابل توجهی بر بازده شمارش دارند. برای مثال، فانتوم‌هایی با تیروئید نزدیک‌تر به آشکارسازها و ضخامت کمتر بافت نرم، بازده شمارش بالاتری داشتند.

۴-۲- اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری

استفاده از فانتوم‌های آماری در این مطالعه نشان داد که تنوع گسترده در ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیک افراد می‌تواند به طور قابل توجهی بر بازده شمارش تأثیر بگذارد. این موضوع اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری را در فرآیند مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن برجسته می‌کند. فانتوم‌های آماری نه تنها تفاوت‌های در قد و وزن، بلکه تغییرات در موقعیت و اندازه اندام‌های داخلی را نیز در نظر می‌گیرند، که این امر به کاهش عدم قطعیت در تخمین پرتوژی بدن افراد آلوده کمک می‌کند.

۴-۳- کاربردهای عملی نتایج

نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌های پرتوژی در افراد آلوده کمک کند. در شرایط اضطراری مانند سوانح هسته‌ای، زمان عامل تعیین‌کننده‌ای است و هرچه سریع‌تر بتوان افراد آلوده را شناسایی و میزان پرتوژی بدن آن‌ها را اندازه‌گیری کرد، اقدامات درمانی و حفاظتی مؤثرتری می‌توان انجام داد. استفاده از فانتوم‌های آماری و مدل‌سازی دقیق



بیوکینتیک ید-۱۳۱ می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در تخمین پرتوزایی بدن افراد آلوده کمک کند و در نتیجه، اقدامات درمانی و حفاظتی مؤثرتری را امکان‌پذیر سازد.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از فانتوم‌های آماری و مدل‌سازی دقیق بیوکینتیک ید-۱۳۱ می‌تواند به بهبود دقت و صحت اندازه‌گیری‌های پرتوزایی در افراد آلوده کمک کند. نتایج این مطالعه اهمیت استفاده از فانتوم‌های آماری در فرآیند مدرج‌سازی مجازی شمارنده‌های تمام بدن را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در تخمین پرتوزایی بدن افراد آلوده کمک کند. این یافته‌ها گامی مهم در جهت افزایش آمادگی برای مقابله با سوانح هسته‌ای و کاهش پیامدهای آن بر سلامت عمومی است. در آینده، توسعه فانتوم‌های آماری بیشتر و بهبود مدل‌های بیوکینتیک می‌تواند به افزایش دقت و کارایی شمارنده‌های تمام بدن کمک کند.

۶- مراجع:

[۱] J. G. Hunt, and L. Bertelli, "Calibration of in vivo measurement systems and evaluation of lung measurement uncertainties using a voxel phantom," Radiat Prot Dosim vol. ۷۶, pp. ۱۷۹-۸۴, ۱۹۹۸.

[۲] S. Pölz, and B. Breustedt, "Personalised body counter calibration using anthropometric parameters," Radiat Prot Dosim, vol. ۷۰(۱-۴), pp. ۲۲۱-۲۲۴, ۲۰۱۶.

[۳] Y. Chen, R. Qiu, C. Li, Z. Wu, and J. Li, "Construction of Chinese adult male phantom library and its application in the virtual calibration of in vivo measurement," Phys Med Biol, vol. ۶۱(۵), pp. ۲۱۲۴, ۲۰۱۶.

[۴] R. Hayano. "Measurement and communication: what worked and what did not in Fukushima", Ann ICRP, vol. ۴۵(۲_suppl), pp. ۱۴-۲۲, ۲۰۱۶.

[۵] F. Paquet, G. Etherington, M. R. Bailey, R. W. Leggett, J. Lipsztein, et al., "ICRP Publication ۱۳۰: Occupational Intakes of Radionuclides: Part ۱," Ann ICRP, vol. ۴۴(۲), pp. ۵-۱۸۸, ۲۰۱۵.

[۶] R. Leggett, "An age-specific biokinetic model for iodine," J Radiol Prot, vol. ۳۷(۴), pp. ۸۶۴-۸۸۲, ۲۰۱۷.



یکی از ما شوید!
انجمن هسته ای ایران

انجمن برتر کشور در سال ۱۴۰۲

🌐 NSI.IR ✉ INFO@NSI.IR

سی و یکمین کنفرانس هسته‌های ایران



۲۳-۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ | مشهد

I N C 3 1 . N S I . I R



پژوهشگاه علوم و فنون
هسته ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



انجمن هسته ای ایران